

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTETA ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**UTJECAJ ZASJENJENJA NA KARAKTERISTIKE
TANKOSLOJNIH FOTONAPONSKIH MODULA**

Diplomski rad

Josip Bušić

Osijek, 2016.

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	3
2. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
3. TEORETSKA PODLOGA ISTRAŽIVANJA	12
3.1. Sunčeva energija.....	12
3.2. Fotonaponski sustavi	15
3.2.1. Općenito o fotonaponskim sustavima.....	15
3.2.2. Shema povezivanja na mrežu	19
3.2.3. Glavni dijelovi fotonaponskog sustava.....	21
3.2.4. Vrste fotonaponskih sustava	27
3.2.5. Naponi i struje u fotonaponskom sustavu.....	30
3.3. Strujno – naponska karakteristika fotonaponskog modula.....	30
3.4. Strujni krug ekvivalentan fotonaponskoj ćeliji.....	32
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	35
4.1. Vrste tankoslojnih fotonaponskih modula.....	35
4.1.1. a-SI tankoslojni fotonaponski moduli.....	36
4.1.2. CdTeS tankoslojni fotonaponski moduli	36
4.1.3. GaAs tankoslojni fotonaponski moduli	37
4.1.4. CIS/CIGS/CIGSS tankoslojni fotonaponski moduli	37
4.2. Karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula.....	38
4.2.1. MASDAR MPV100-S	38
4.2.2. SOLAR FRONTIER SF-150	39
4.3. Mjerni instrumenti	40
4.4. Simulacija zasjenjenja	42
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	47

5.1. MASDAR MPV100-S	47
5.2. SOLAR FRONTIER SF-150.....	56
5.3. Analiza rezultata istraživanja.....	65
6. ZAKLJUČAK	68
LITERATURA.....	69
SAŽETAK.....	70
ABSTRACT	71
ŽIVOTOPIS	72
PRILOG	73
Popis slika.....	73
Popis tablica.....	77

1. UVOD

Jedan od najvećih izazova moderne civilizacije je omjer godišnje potrošnje fosilnih goriva i njihovih raspoloživih rezervi. Prema izvješćima Međunarodne energetske agencije raspoložive rezerve fosilnih goriva mogu zadovoljavati ljudske potrebe najdulje do 2088. godine, i to ugljenom, dok će rezerve naftnih derivata, ovim trendom potrošnje, potrajati do 2060. godine, a rezerve plina do 2053. godine, najkraće od svih fosilnih goriva. [1]

Dodatni gorući problem nastavka iskorištavanja fosilnih goriva je onečišćenje okoliša, zbog čega je Europska komisija, zabrinuta za budućnost planeta Zemlje, donijela Direktivu 2020/2955/EU, kojom su zakonski uokvirili ciljeve proizvodnje i iskorištenja energije do 2020. godine. Prema Direktivi 2020/2955/EU ciljevi Europske unije su smanjenje emisije stakleničkih plinova za 40 %, poboljšanjem učinkovitosti energetske sustava smanjenje ukupne potrošnje električne energije za 39 % te ostvarenje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji od 27 %, sve do 2020. godine. [2] Fotonaopni sustavi, tema ovog diplomskog rada, su jedna od novijih tehnologija koja već uvelike približava solarnu budućnost civilizacije.

Sunce emitira gotovo nezamislivu količinu energije prema planetu Zemlji – oko 10^{17} W. [3] Rječnikom isporuke električne energije, vrijednost jednaka izlaznoj snazi tisuću milijuna modernih nuklearnih ili elektrana pogonjenih fosilnim gorivima. Drugim riječima, Sunce emitira u jednom satu količinu energije dovoljnu za zadovoljenje godišnjih energetskih potreba cijelog čovječanstva. Čini se da je sve što je potrebno učiniti kako bismo pretvorili današnju civilizaciju iz „ugljkove u solarnu“ iskoristiti samo maleni dio nezamislivog sunčevog energetskog potencijala.

Međutim, postoje razlozi zbog kojih pretvaranje modernog društva iz „ugljkova u solarno“ nije jednostavan zadatak. Naime, većina sunčevog zračenja planeta Zemlje pada na svjetske oceane. Dio sunčeve energije se „gubi“ na oblacima, kao što dio energije do Zemlje dolazi u nezgodno vrijeme za korištenje. Ipak, kad se i navedeni nedostaci uzmu u obzir svedeno se čini kako je Sunce veliki energetski dobrotvor ljudske vrste. Mogućnosti za iskorištavanje sunčeve energije, bilo izravno zastupljene sunčevim zrakama ili neizravno putem vjetrova, valova, hidroelektrana ili biomase, čine se ograničenima samo našom maštom, tehnoloških vještina i/ili političkom odlučnošću.

Gustoća sunčeve snage, tj. snaga sunčevog zračenja po jedinici površine iznad atmosfere Zemlje je poznata kao *solarna konstanta* i iznosi 1.366 W/m^2 . [4] Jakost sunčevog zračenja se smanjuje za oko 30 % prolazeći kroz atmosferu, rezultirajući s oko 1.000 W/m^2 sunčeve ozračenosti površine Zemlje na razini mora za vedra dana. Navedena vrijednost je općeprihvaćeni standard za „jaku ozračenost“ i u širokoj je upotrebi za testiranje i kalibriranje fotonaponskih ćelija i sustava diljem planeta Zemlje.

Sljedeća važna vrijednost je prosječna gustoća snage koja se emitira na Zemlju tijekom cijele godine, poznata kao *srednja godišnja ozračenost*. Jednostavan način za shvaćanje navedenoga je činjenica da je Zemlja, gledajući sa Sunca, disk polumjera R i površine $R^2\pi$. No, budući da je Zemlja zapravo sfernog oblika površine $4 \cdot R^2\pi$, srednja godišnja ozračenost iznad atmosfere iznosi $1.366/4 = 342 \text{ W/m}^2$. Međutim, srednja godišnja ozračenost se dijeli nejednako na površini Zemlje. Iznad ekvatora iznosi oko 430 W/m^2 te se smanjuje prema polarnim područjima koja su zakošena i daleko od Sunca. U nekim dijelovima Zemlje su oblaci glavni razlog smanjenosti sunčeve ozračenosti planeta. Vidljivo je da je prosječna ozračenost na površini Zemlje uvelike utjecana lokalnim klimatskim uvjetima, u rasponu od 300 W/m^2 u saharskom području i dijelovima Tihog oceana do manje od 80 W/m^2 u blizini Sjevernog odnosno Južnog pola. [3]

Fotonaponski sustavi su uspješan i najzastupljeniji način iskorištenja sunčeve energije na Zemlji. Današnjih dana su u najširoj ljudskoj upotrebi za proizvodnju električne energije iz sunčeve energije fotonaponske ćelije kristalnih tehnologija, koje imaju svoje nedostatke i nesavršenosti. Najsuremenija tehnologija pretvorbe sunčeve u električnu energiju su tankoslojne fotonaponske ćelije koje su još uvijek nedovoljno istražene i nedovoljno zastupljene na svjetskom tržištu iako se čini da imaju ogroman potencijal. U skladu s navedenim, tema ovog diplomskog rada su tankoslojne fotonaponske ćelije, odnosno utjecaj zasjenjenja tankoslojnih fotonaponskih modula na njihovu karakteristiku. Želja autora i mentora ovog diplomskog rada je pridonošenje znanjima o ovoj tehnologiji izrade fotonaponskih modula koji su budućnost proizvodnje električne energije iz sunčeve energije.

U sklopu ovog rada, podijeljenog u četiri zasebne cjeline, iznijet će se zadatak diplomskog rada, pregled dosadašnjih istraživanja, teoretska podloga provođenja te metodologija istraživanja. Završni dio rada uključuje prikaz rezultata i analizu provedenog istraživanja, kao i pripremu iznošenja zaključka diplomskog rada.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Utjecaj zasjenjenja na karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula

Istražiti relevantnu literaturu vezanu uz utjecaj zasjenjenja na karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula. Opisati vrste tankoslojnih fotonaponskih modula, tehnologiju izrade, osnovne karakteristike te primjenu. U Laboratoriju za obnovljive izvore energije Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek istražiti utjecaj zasjenjenja tankoslojnih fotonaponskih modula (tehnologija a-Si i CIS). Detaljno opisati i dokumentirati postupak istraživanja. Napraviti analizu rezultata istraživanja. Dati zaključke na temelju provedenog istraživanja i rezultata analize podataka.

Nastavnik: doc.dr.sc. Danijel Topić

2. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju diplomskog rada će se dati prikaz rezultata dosadašnjih provedenih istraživanja u svijetu uz danu teoretsku podlogu, kao i njihove rezultate. Obradit će se tri objavljena znanstvena rada na ovu temu znanstvenika iz Kine, Namibije i Portugala kako bismo čitateljima dali okvir za razumijevanje čitanja uvodnog poglavlja i ostalih, kao i rezultata istraživanja provedenog za potrebe ovog rada te zaključka ovog istraživanja.

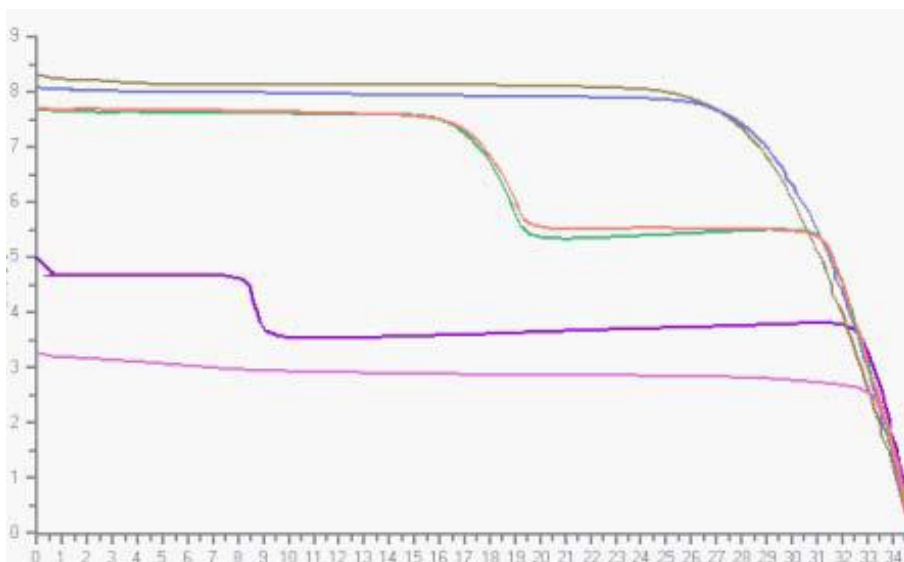
U veljači 2013. godine su kineski znanstvenici Yunlin Sun, Xiangzhi Li, Ruijiang Hong i Hui Shen sa Škole fizike i inženjeringa Sun Yat-Sen sveučilišta iz grada Guangzhou, Kina proveli i objavili rezultate svog istraživanja. [5]

Kako bi analizirali utjecaj zasjenjenja uzrokovanih vodovima elektroenergetskog sustava na električne karakteristike fotonaponskih modula, istraživanje su ovi kineski znanstvenici proveli na velikim fotonaponskim sustavima spojenima na mrežu, koja su instalirana u sjeverozapadnoj Kini. Istraživanje su provodili na modulima polikristalne silicijske tehnologije, proizvedenima u Kini. Moduli su sastavljeni od 60 fotonaponskih ćelija ($156\text{ mm} \cdot 156\text{ mm}$) spojenih u seriju. U svaki modul su ugrađene tri jednostrano propusne diode koje obuhvaćaju po 20 fotonaponskih ćelija svaka. Nazivni podaci istraživanih fotonaponskih modula su $P_{\max} = 220\text{ W}$, $U_{\text{mpp}} = 29,0\text{ V}$, $I_{\text{mpp}} = 7,95\text{ A}$, $U_{\text{ph}} = 36\text{ V}$ te $I_{\text{ks}} = 8,19\text{ A}$.

Slika 2.1. prikazuje zasjenjenje šest numeriranih modula, na kojima su proveli istraživanje, uzrokovano vodovima elektroenergetskog sustava, dok *slika 2.2.* prikazuje šest strujno-naponskih karakteristika koje odgovaraju šest numeriranih modula.



Slika 2.1. Zasjenjenja na numeriranim fotonaponskim modulima uzrokovana dijelovima distribucijskog sustava, kao što su vodovi ili nosivi stupovi vodova, u blizini fotonaponskih sustava.



Slika 2.2. Šest strujno-naponskih karakteristika koje odgovaraju šest numeriranih modula na kojima je provedeno istraživanje.

Promatrajući *sliku 2.1.* i *sliku 2.2.*, vidljivo je da modul broj 2 i modul broj 3 nisu zasjenjeni te da nisu ugrožena njihova električna svojstva. Međutim, električna svojstva modula broj 1, broj

4, broj 5 i broj 6 su smanjena, što je uzrokovano zasjenjenima koja padaju na njih. No, zasjenjeni moduli nisu u potpunoj disfunkciji zbog zaštite koju osiguravaju jednostrano propusne diode te su njihove karakteristike različite, kako su različite veličine površina i položaji zasjenjenja na modulima. Očigledno je, prema njihovom istraživanju, stoga da na električne karakteristike zasjenjenih fotonaponskih modula ne utječe samo činjenica zasjenjenja nego i položaj i veličina površine zasjenjenja.

Kineski znanstvenici Yunlin Sun, Xiangzhi Li, Ruijiang Hong i Hui Shen su, prema rezultatima svog istraživanja, zaključili da se mogu razlikovati različita zasjenjenja na fotonaponskom sustavu povezanom na mrežu u sjeverozapadnoj Kini. Zasjenjenja su uzrokovana vodovima, ptičjim izmetom te obližnjim građevinama. Iz rezultata istraživanja, zaključili su kineski znanstvenici, je vidljivo da zasjenjenja utječu na električne karakteristike istraživanih fotonaponskih modula. Također je, prema njima, vidljivo da iste veličine površina sjena na različitim pozicijama uzrokuju znatno različite učinke na električne karakteristike istraživanih fotonaponskih modula.

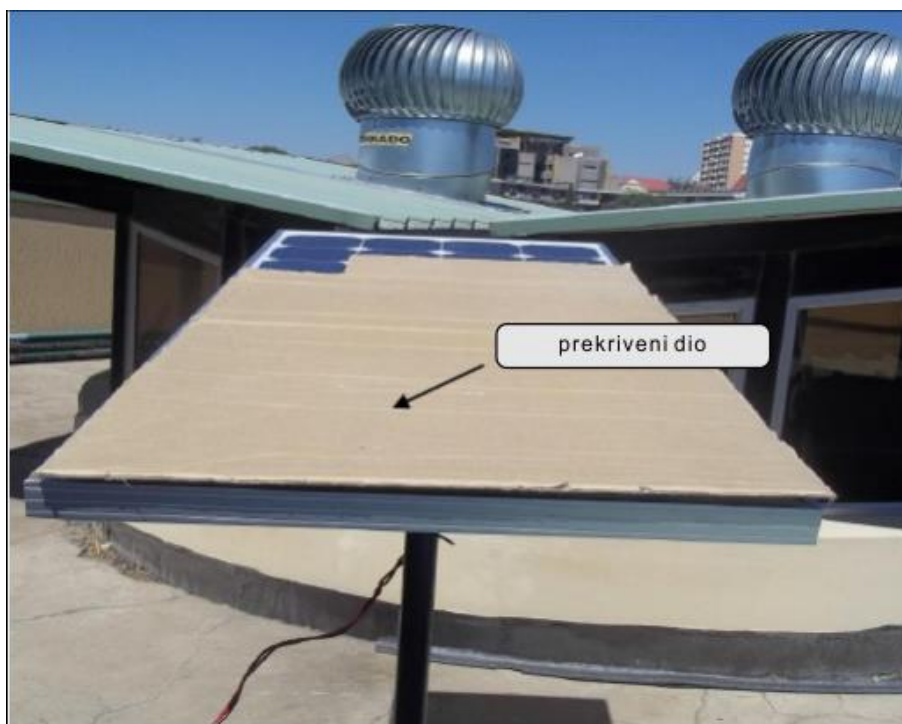
U ožujku 2013. godine su namibijski znanstvenici Andrew Zulu i Gelasius Kashweka s Odjela za strojarstvo Tehničkog veleučilišta u Windhoeku, iz grada Windhoek, Namibija proveli i objavili rezultate svog istraživanja. [6]

Fotonaponski sustav, korišten za potrebe ovog istraživanja u Namibiji, 85-W sadrži 36 fotonaponskih modula sa sljedećim podacima, pri standardnim tehničkim uvjetima IEC 60904 (1000 W/m^2 , $A_m = 1,5$, temperatura ćelija $25 \text{ }^\circ\text{C}$): $P_{\max} = (85,0 \pm 2,6) \text{ W}$, $U_{\text{mpp}} = 17,2 \text{ V}$, $I_{\text{mpp}} = 4,94 \text{ A}$, $U_{\text{ph}} = 21,6 \text{ V}$, $I_{\text{ks}} = 5,42 \text{ A}$, $U_{\max} = 1.000 \text{ V}$, $P_{\text{iz}} = (547,2) \text{ W}$ te $\eta = 15,5 \text{ \%}$. Mjerenjima su utvrđeni sljedeći podaci: $P_{\max} = (74,0 \pm 2,2) \text{ W}$, $U_{\text{mpp}} = (14,40 \pm 0,14) \text{ V}$, $I_{\text{mpp}} = (5,15 \pm 0,10) \text{ A}$, $U_{\text{ph}} = (19,60 \pm 0,20) \text{ V}$, $I_{\text{ks}} = (5,75 \pm 0,16) \text{ A}$, $P_{\text{iz}} = (524,0 \pm 14,3) \text{ W}$ te $\eta = (14,0 \pm 0,8) \text{ \%}$.

Dva mjerenja su izvedena pri sljedećim uvjetima:

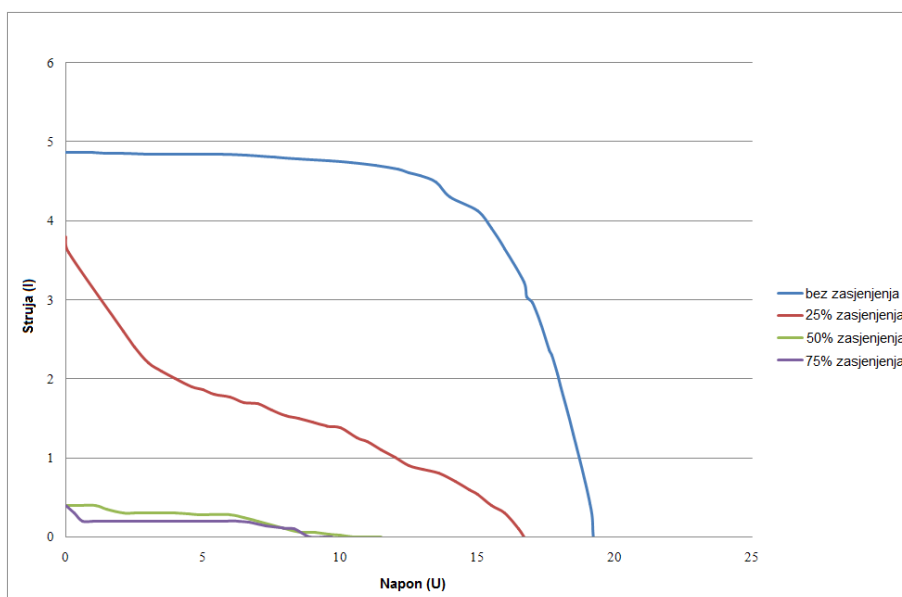
- mjerenja provedena pri istoj temperaturi, uz toleranciju od $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- mjerenja provedena brzo kako bi se spriječilo pregrijavanje fotonaponskih modula;
- fotonaponski modul bez prašine.

Mjerenja su izvodili pomoću promjenjivog otpornika iznosa $1.000 \text{ }\Omega$. Prekrili su tri četvrtine (75 %) fotonaponskog modula pomoću kartona kao što je prikazano na slici 2.3..

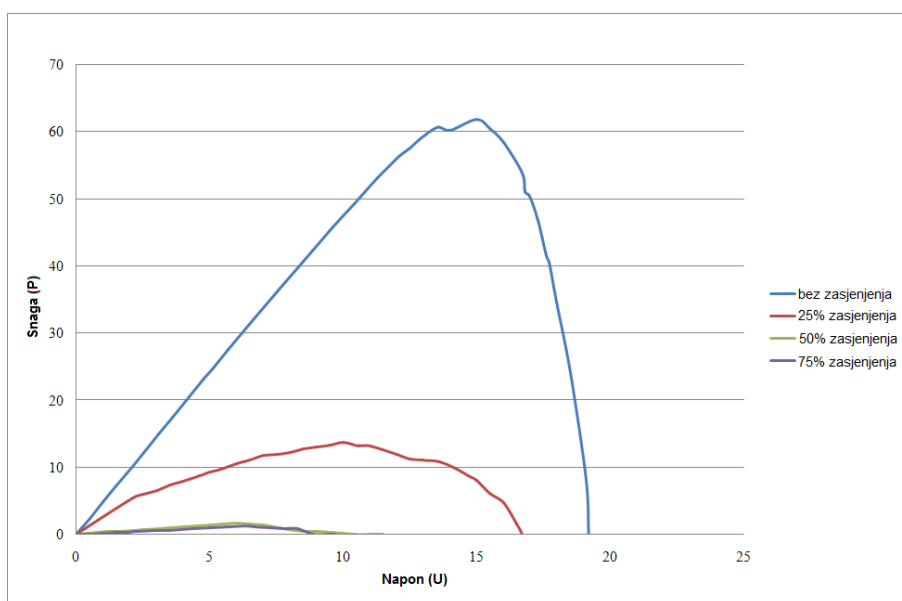


Slika 2.3. Fotonaponski modul, tri četvrtine prekrivene.

Napon praznog hoda i struju kratkog spoja su autori mjerili bez opterećenja sustava. Postupak su ponovili za slučajeve u kojima je prekrivena polovicu (50 %) i četvrtina (25 %) mjerelog fotonaponskog modula. Rezultati koje su autori rada dobili mjerenjima su prikazani na slikama 2.4. (strujno-naponska karakteristika) i 2.5. (karakteristika snage i napona).



Slika 2.4. Strujno-naponska karakteristika.



Slika 2.5. Karakteristika snage i napona.

Iz strujno-naponske karakteristike je vidljivo da je struja smanjena za 25 % prekrivenosti fotonaponskog modula, dok za 50 % i 75 % prekrivenosti fotonaponskog modula protok struje gotovo i ne postoji. Učinkovitost fotonaponskog sustava na kojem su izvođena mjerenja za potrebe ovog rada iznosi $(13,3 \pm 1,1) \%$ za pogon bez prekrivanja, $(2,9 \pm 0,2) \%$ za 25 % prekrivenosti fotonaponskog modula, dok za 50 % i 75 % prekrivenosti fotonaponskog modula učinkovitost iznosi $(0,8 \pm 0,1) \%$. Izneseni rezultati zorno pokazuju značaj utjecaja zasjenjenja na rad fotonaponskog sustava.

Iz karakteristike snage i napona je vidljivo da je snaga fotonaponskog sustava značajno smanjena za 25 % prekrivenosti, dok za 50 % i 75 % prekrivenosti gotovo da ne postoji protok struje. Fotonaponski sustav na kojem su izvođena mjerenja nema ugrađene zaštitne jednostrano propusne diode, stoga struja proizvedena u neprekrivenim fotonaponskim ćelijama prolazi kroz prekrivene fotonaponske ćelije koje u sustavu predstavljaju električni teret (otpor). Također, svi podaci karakteristike snage i napona prikazuju jasan trend smanjenja iznosa podataka s povećanjem postotka prekrivenosti fotonaponskog sustava.

U zaključnom dijelu svog rada autori iznose zaključak da se izlazna snaga fotonaponskog sustava značajno smanjuje kad je sustav izložen prekrivenosti fotonaponskih ćelija. Naglašavaju da je kod ugradnje fotonaponskih sustava vrlo važno izbjeći bilo kakva zasjenjenja jer se za 25 %

prekrivenosti sustava njegova izlazna snaga smanjuje za oko 75 %, dok se za 50 % i 75 % prekrivenosti izlazna snaga sustava smanjuje i do 90 %.

U listopadu 2014. godine su portugalski znanstvenici L. Fialho, R. Melicio, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, M. Collares-Pereira s Odjela za fiziku Sveučilišta u Evori iz grada Evora, Portugal, Odjela za elektrotehniku i automatizaciju Instituta vrhunskog inženjeringa iz grada Lisabona, Portugal te s Instituta vrhunske tehnike Sveučilišta u Lisabonu iz grada Lisabona, Portugal proveli i objavili rezultate svog istraživanja. [7]

Tablica 2.1. prikazuje podatke za monokristalni silicijski fotonaponski modul Siemens SP75 pri standardnim tehničkim uvjetima.

Tablica 2.1. Podaci za Siemens SP75 fotonaponski modul pri standardnim tehničkim uvjetima.

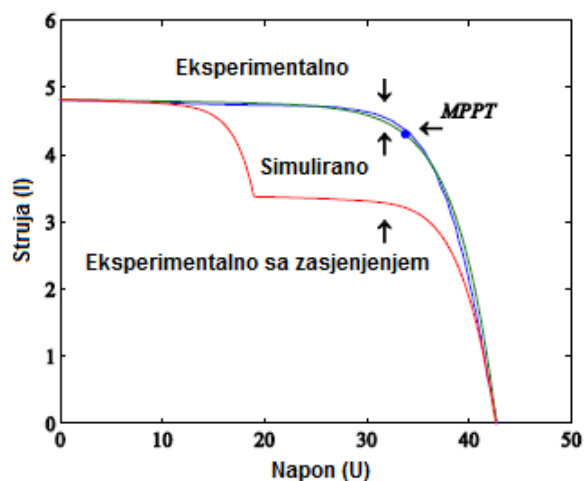
Tehnologija	U_{mpp}	I_{mpp}	U_{ph}	I_{ks}	Ćelije	α_{ks}	β_{ph}
Monokristalna	17 V	4,4 A	21,7 V	4,8 A	72	2,6 mA/°C	-77 mV/°C

Mjereni fotonaponski sustav formiran od dva monokristalna silicijska fotonaponska modula spojena u seriju, bez sustava za zakretanje fotonaponskih modula s ciljem praćenja Sunca, prikazan je na slici 2.6..



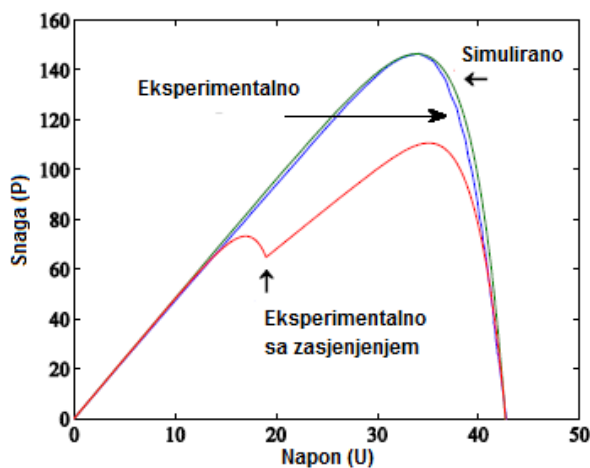
Slika 2.6. Fotonaponski sustav formiran od dva monokristalna silicijska fotonaponska modula spojena u seriju.

Djelomično zasjenjenje je dato pri sljedećim uvjetima $G_1 = 1.000 \text{ W/m}^2$ i $G_2 = 700 \text{ W/m}^2$. Strujno-naponska karakteristika, simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem, je prikazana na *slici 2.7.*



Slika 2.7. Strujno-naponska karakteristika simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem.

Karakteristika snage i napona, simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem prikazana je na *slici 2.8.*



Slika 2.8. Karakteristika snage i napona simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem.

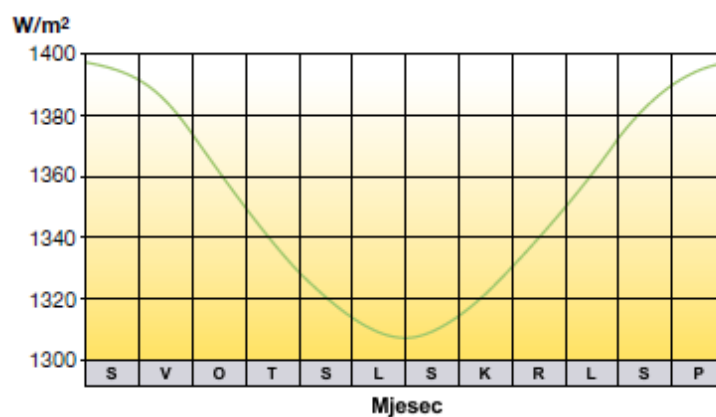
Slika 2.7. i slika 2.8. otkrivaju implikaciju zasjenjenja na strujno-naponske i karakteristiku snage i napona, to jest, zbog nejednolike osvjetljenosti dva modula u seriji postoje dvije točke najviše snage, što može uzrokovati probleme za sustav praćenja točke najviše snage te gubitke za očekivanu pretvorbu energije.

U zaključnom dijelu svog rada, portugalski znanstvenici zaključuju da se ekvivalentni krug fotonaponske ćelije s pet parametara koristi za izradu strujno-naponske i karakteristiku napona i snage. Pet parametara su procijenjeni heurističkom metodom koristeći samo podatke dane od proizvođača fotonaponskih modula, i to podatke vezane za prazan hod, maksimalnu snagu i kratki spoj fotonaponskog modula. Nakon što su učinili identifikaciju pet parametara, simulirali su zasjenjenja. Simulacija može prikazati utjecaj djelomičnog zasjenjenja na smanjenje proizvedene energije pomoću fotonaponskog sustava, što treba uračunati u ekonomsko planiranje u fazi projektiranja fotonaponskog sustava. Usporedba dobivenih rezultata simulacijom i mjerenjem pokazala je da je heuristička metoda dosta zadovoljavajuća. Studiju slučaja sa simulacijom utjecaja zasjenjenja su prikazali kako bi pokazala posljedice zasjenjenja na maksimalnu snagu.

3. TEORETSKA PODLOGA ISTRAŽIVANJA

3.1. Sunčeva energija

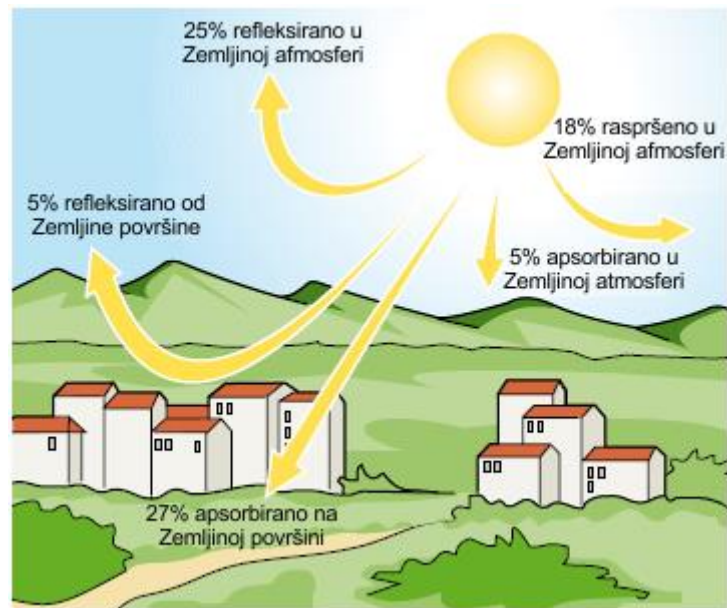
U Sunčevoj se jezgri neprestano odvijaju termonuklearne fuzijske reakcije pri milijunskim iznosima temperature koje oslobađaju ogromne količine energije u obliku elektromagnetskih zračenja. Dio oslobođene energije doseže vanjske granice atmosfere Zemlje s prosječnim iznosom zračenja (solarna konstanta) oko $1.367 \text{ W/m}^2 \pm 3 \%$. Iznos solarne konstante ovisi o udaljenosti Zemlje od Sunca, prikazano na *slici 3.1.* te o sunčevoj aktivnosti (sunčevim pjegama).



Slika 3.1. Sunčevo zračenje po mjesecima.[8]

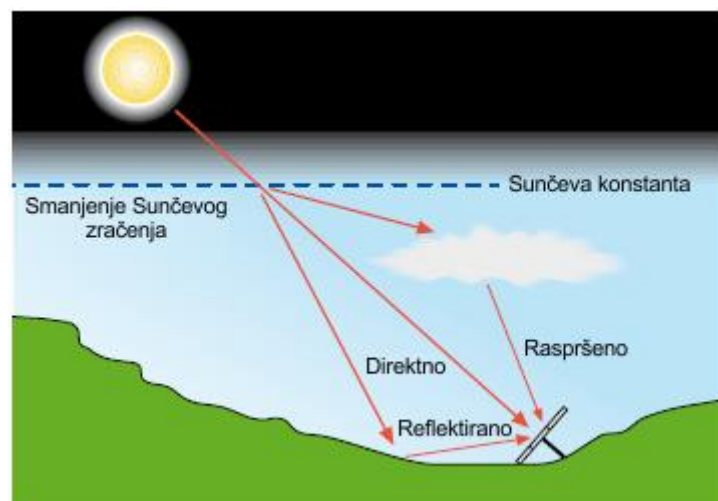
Pojam sunčevog zračenja precizno znači intenzitet sunčevog elektromagnetskog zračenja jednog kvadratnog metra površine Zemlje (W/m^2).

Prolaskom kroz atmosferu, intenzitet sunčevog zračenja se smanjuje zbog djelomične refleksije i apsorpcije (prvenstveno zbog vodene pare i drugih atmosferskih plinova). Zračenje koje prođe kroz atmosferu se djelomično raspršiva zrakom zbog čvrstih čestica sadržanih u zraku, prikazano na *slici 3.2.*



Slika 3.2. Intenzitet sunčevog zračenja od Sunca, preko atmosfere do površine Zemlje. [8]

Sunčevo zračenje koje pada na vodoravnu površinu se sastoji od izravnog zračenja, raspršenog zračenja koje na površinu pada s cijelog neba (ne s nekog posebnog dijela) te zračenja reflektiranog od površine Zemlje i postojećeg na površini Zemlje, prikazano na slici 3.3.. Zimi je nebo pretežno oblačno pa je zimi komponenta raspršenog zračenja veća od komponente direktnog zračenja.



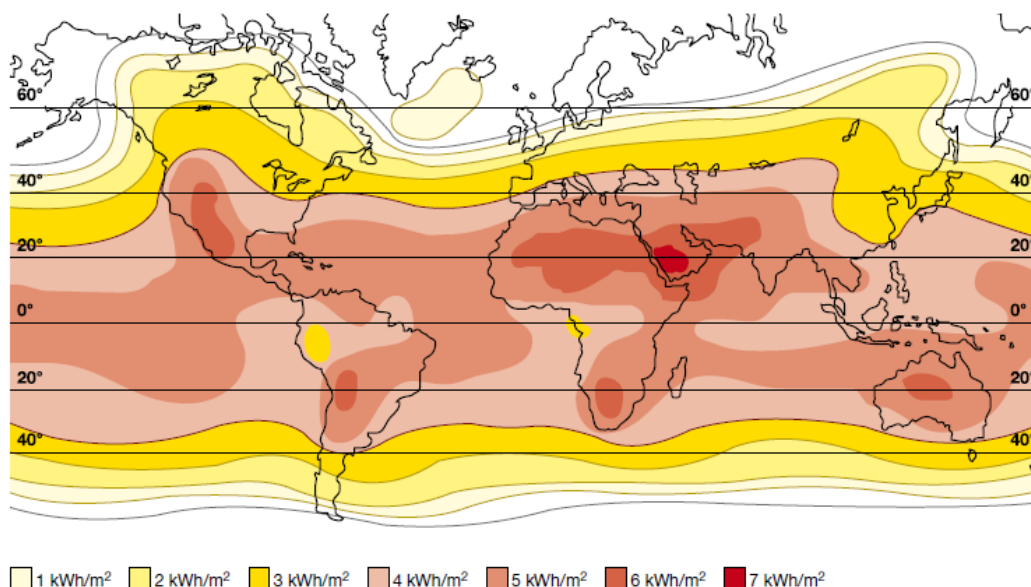
Slika 3.3. Komponente sunčevog zračenja. [8]

Komponenta raspršenog zračenja ovisi o ovoj reflektirajućoj sposobnosti površine Zemlje te se izražava kao faktor refleksije posebno dan za svaku vrstu podloge. *Faktor refleksije* nekih materijala je prikazan u *tablici 3.1.*

Tablica 3.1. Refleksijska moć. [8]

Vrsta podloge	Faktor refleksije
Zemljani putevi	0,04
Vodene površine	0,07
Crnogorične šume zimi	0,07
Istrošeni asfalt	0,10
Bitumenski krovovi	0,13
Tla (glina, lapor)	0,14
Suha trava	0,20
Krš	0,20
Istrošeni beton	0,22
Šume jeseni i polja	0,26
Zelene površine	0,26
Građevine tamnih površina	0,27
Mrtvo lišće	0,30
Građevine svijetlih površina	0,60
Svježi snijeg	0,75

Slika 3.4. prikazuje sunčani atlas Zemlje s prosječnim sunčevim zračenjem ravnine nagnute za 30°, orijentacije prema jugu, prikazane u kWh/m²/danu.



Slika 3.4. Sunčani atlas Zemlje. [8]

3.2. Fotonaponski sustavi

3.2.1. Općenito o fotonaponskim sustavima

Tankoslojni fotonaponski moduli su vrsta fotonaponskih modula koji proizvode električnu energiju pomoću pretvorbe sunčeve energije u električnu. Kako bi postigli bolje razumijevanje tehnologije izrade tankoslojnih fotonaponskih modula, pregled njihovih vrsta te karakteristika dat ćemo teoretski uvod u fotonaponske module i njihov način funkcioniranja.

Fotonaponski sustavi sunčevu energiju direktno i trenutačno pretvaraju u električnu energiju bez korištenja bilo kakvih pogonskih goriva. Fotonaponska tehnologija počiva na poluvodičkim komponentama koje pri izloženosti sunčevom zračenju generiraju elektricitet.

Osnovne prednosti fotonaponskih sustava mogu biti sažete u sljedeće:

- distribuirana proizvodnja na mjestu gdje je to potrebno;
- nema emisije onečišćujućih tvari;
- neovisnost o fosilnim gorivima;
- pouzdanost sustava jer nemaju pokretnih dijelova (korisni vijek trajanja najčešće iznad 20 godina);
- minimalni troškovi održavanja;

- visoka modularnost fotonaponskog sustava prema stvarnim potrebama korisnika (za povećanje snage elektrane dovoljno povećanje broja fotonaponskih modula).

Međutim, početna cijena razvoja i instaliranja fotonaponskog sustava je vrlo visoka zbog neostvarene potpune tržišne zrelosti s tehnološkog i ekonomskog aspekta. Osim toga, proizvodnja električne energije nije stalna jer ovisi o izvoru energije – sunčevom zračenju.

Godišnja proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava ovisi o različitim faktorima među kojima su:

- kvaliteta sunčeva zračenja na mjestu instaliranja elektrane;
- nagib i orijentacija fotonaponskih modula;
- postojanost ili nepostojanost zasjenjenja elektrane;
- tehničke karakteristike komponenti sustava (uglavnom fotonaponskih modula i invertera).

Osnovne primjene fotonaponskih sustava su:

- sustavi za korisnike koji nemaju mogućnost pristupa mreži (sa sustavima za pohranu električne energije);
- sustav za korisnike priključene na mreže niskog napona;
- sustavi priključeni na mreže srednjeg napona, elektrane snage veće od 1 kW.

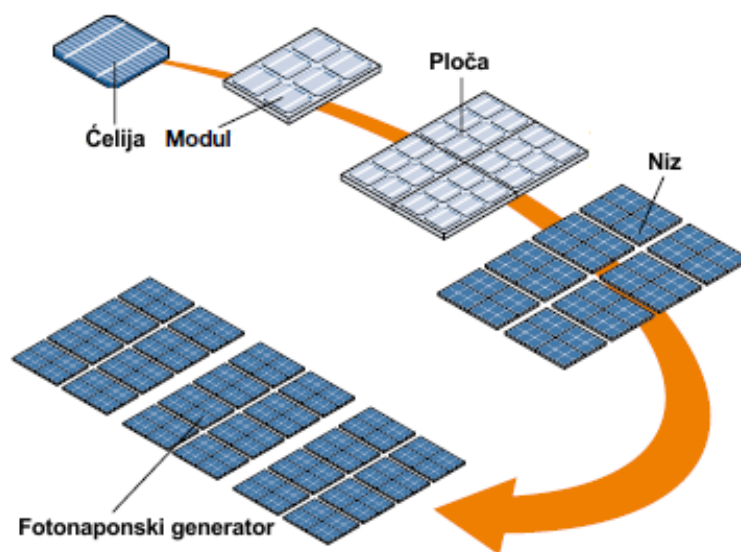
Fotonaponski sustavi su uglavnom sastavljena od generatora (fotonaponskih modula), nosive konstrukcije za ugradnju generatora na tlo, zgradu ili na građevinu bilo koje vrste, sustava za kontrolu snage elektrane i uvjeta njenog rada, moguće i od sustava za pohranu električne energije, prekidačkih i razvodnih sklopova, zaštitne opreme i priključnih kabela.

Više mehanički i električno povezanih fotonaponskih ćelija, kod kristalne tehnologije izrade fotonaponskih modula, čine fotonaponski modul koja je uobičajen fotonaponski oblik koji se instalira na konstrukciju na tlu ili na građevinu, prikazano na *slici 3.5.*



Slika 3.5. Fotonaponski modul. [8]

Nekoliko serijski povezanih fotonaponskih modula čine niz, a više nizova električno povezanih u paralelu za proizvodnju potrebne snage čine generator, odnosno fotonaponsko polje, prikazano na *slici 3.6.* i na *slici 3.7.*



Slika 3.6. Fotonaponski sustav. [8]



Slika 3.7. Fotonaponski sustav. [8]

Fotonaponske ćelije koje čine fotonaponske module nisu potpuno identične zbog neizbježnih proizvodnih odstupanja, odnosno dva bloka paralelno spojenih fotonaponskih ćelija mogu imati različite iznose napona koje proizvode. Kao posljedicu toga imamo pojavu da struja generirana na bloku višeg napona, ukoliko je takav slučaj u praksi, teče prema bloku nižeg napona što uzrokuje stvaranje gubitaka snage proizvedene na određenom fotonaponskom modulu.

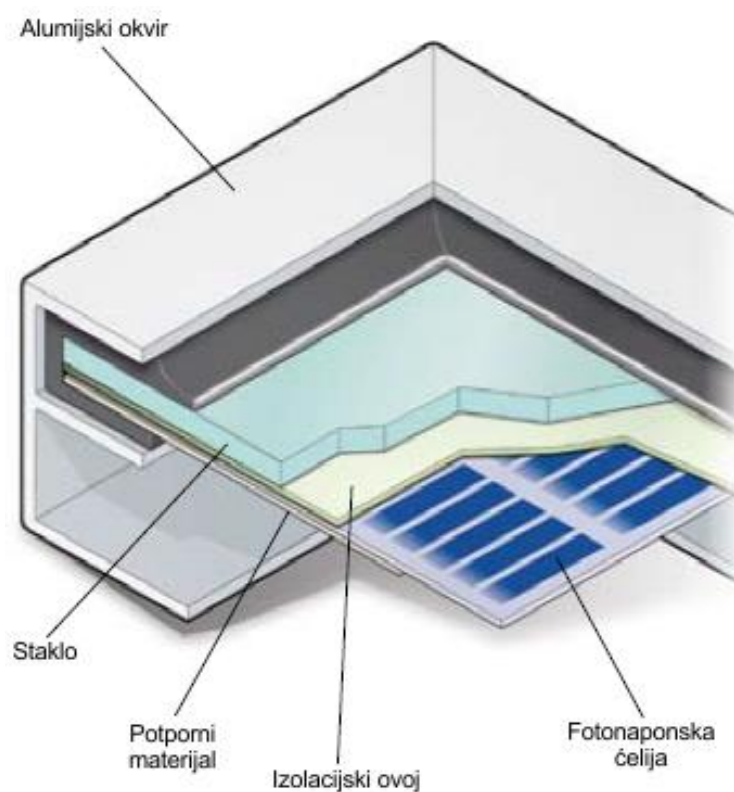
Nejednakost fotonaponskih ćelija se također može očitovati i različitim iznosom ozračenosti. Npr. u slučaju kada je dio fotonaponskih ćelija u sjeni, tj. nema izravno sunčevo zračenje ili u slučaju kada su se određene fotonaponske ćelije pogoršale u svojim karakteristikama, što je moguće s povećanjem vremena rada fotonaponskih ćelija. Takve fotonaponske ćelije u fotonaponskom modulu djeluju kao diode, odnosno blokiraju protok električne energije generirane sunčevim zračenjem potpuno ispravnih fotonaponskih ćelija. Fotonaponske ćelije (dioda) su pod naponom susjednih fotonaponskih ćelija što može uzrokovati perforaciju P – N sloja lokalnim pregrijavanjem i, u konačnici, oštećenje fotonaponskih modula.

Kako bi se izbjegli spomenuti mogući problemi, fotonaponske ćelije se u fotonaponske module ugrađuju na način da su fotonaponske ćelije:

- električno izolirane s vanjske strane;
- zaštićene od atmosferskih prilika i mehaničkih naprezanja;
- otporne na ultraljubičaste zrake, niske temperature, nagle promjene temperature i struganja;
- sigurne od pregrijavanja kvalitetno omogućenim hlađenjem, kako bi se izbjeglo smanjenje snage koju fotonaponski modul isporučuje.

Standardne karakteristike moraju ostati očuvane tijekom cijelog očekivanog životnog vijeka fotonaponskog modula. *Slika 3.8.* prikazuje presjek standardnog fotonaponskog modula izrađenog od kristalnog silicija, sastavljanog od:

- zaštitne folije na gornjoj strani izloženoj sunčevom zračenju, vrlo velike prozirnosti, najčešće izrađene od brušenog stakla;
- ovoja koji sprječava izravan kontakt zaštitne folije i fotonaponske ćelije, koji se također koristi kao izolacija fotonaponske ćelije od ostatka fotonaponskog modula;
- potpornog materijala (staklo, metal, plastika) na donjoj strani;
- metalnog okvira, najčešće izrađenog od aluminija.

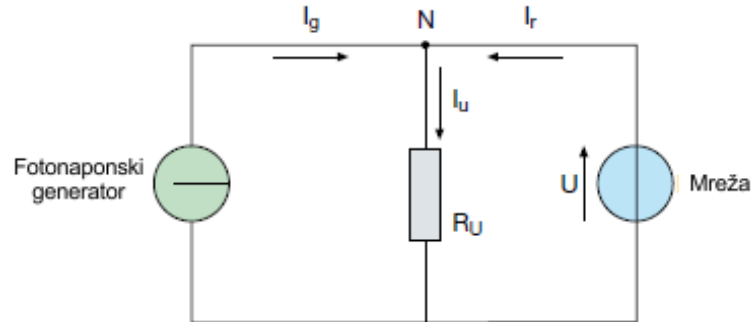


Slika 3.8. Presjek standardnog fotonaponskog modula. [8]

3.2.2. Shema povezivanja na mrežu

Fotonaponski sustav spojen na mrežu koje opskrbljuje potrošača je na pojednostavljen način prikazano shemom na *slici 3.9.*.

Mreža (pretpostavlja se da ima beskonačnu snagu kratkog spoja) je shematski prikazana pomoću idealnog naponskog izvora čije su vrijednosti neovisne o uvjetima potrošačkog opterećenja. S druge strane sheme, fotonaponski je generator prikazan kao idealan strujni izvor (konstantnog iznosa struje, konstantnog ozračenja), dok je potrošačko opterećenje prikazano otpornikom R_u .



Slika 3.9. Shema fotonaponskog sustava spojenog na mrežu. [8]

Struje I_g i I_r , koje nastaju u fotonaponskom generatoru odnosno u mreži, konvergiraju u čvoru N na slici 3.9., dok struja I_u , koju apsorbira potrošačko opterećenje R_u , izlazi iz čvora N :

$$I_u = I_g + I_r.$$

Kako je struja I_u također i omjer mrežnog napona U i otpornika potrošačkog opterećenja R_u :

$$I_u = \frac{U}{R_u},$$

tako odnos između struja postaje:

$$I_r = \frac{U}{R_u} - I_g.$$

Ukoliko u prethodnu jednadžbu uvrstimo $I_g = 0$, kao što bude tijekom noćnih sati, struja koja proizlazi iz mreže postaje:

$$I_r = \frac{U}{R_u}.$$

Također, ukoliko potrošačko opterećenje apsorbira svu struju proizvedenu u fotonaponskom sustavu, struja koja proizlazi iz mreže poprima vrijednost nula te vrijedi sljedeća jednadžba:

$$I_g = \frac{U}{R_u}.$$

Ako pri izraženom povećanju ozračenosti proizvedena struja I_g postane veća od potreba potrošačkog opterećenja I_u , struja mreže I_r postaje negativna te se više ne uzima iz mreže nego se daje u mrežu.

Snage u shemi fotonaponskog sustava iznose kako slijedi:

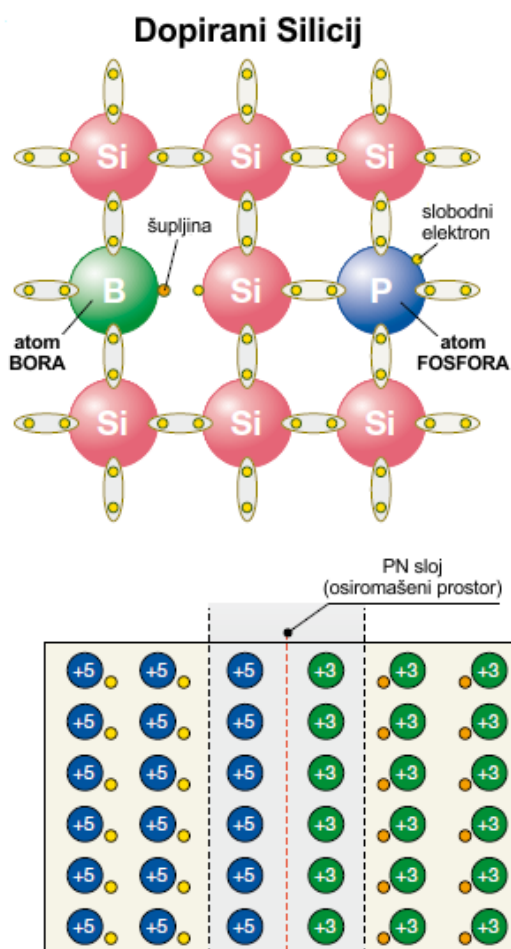
- $P_u = U \cdot I_u = \frac{U^2}{R_u}$ – snaga koja se troši na potrošačkom opterećenju;
- $P_g = U \cdot I_g$ – snaga koju proizvodi fotonaponsko postrojenje;
- $P_r = U \cdot I_r$ – snaga koju isporučuje mreža.

3.2.3. Glavni dijelovi fotonaponskog sustava

3.2.3.1. Fotonaponski generator

Osnovna komponenta fotonaponskog generatora je fotonaponska ćelija u kojoj se odvija pretvorba sunčevog zračenja u električnu energiju. Fotonaponska ćelija se sastoji od tankog sloja poluvodičkog materijala, izrađenog od pravilno dopiranog silicija, debljine oko 0,3 mm i površine od 100 do 225 cm².

Silicij, koji posjeduje četverovalentne elektrone, je dopiran dodavanjem trovalentnog atoma (npr. bora – P tip) na jedan sloj te dodavanjem peto valentnog atoma (npr. fosfora – N tip) na drugi sloj. Nakon dopiranja silicijski sloj P – tipa ima višak šupljina, dok sloj N – tipa ima višak elektrona, prikazano na *slici 3.10.*

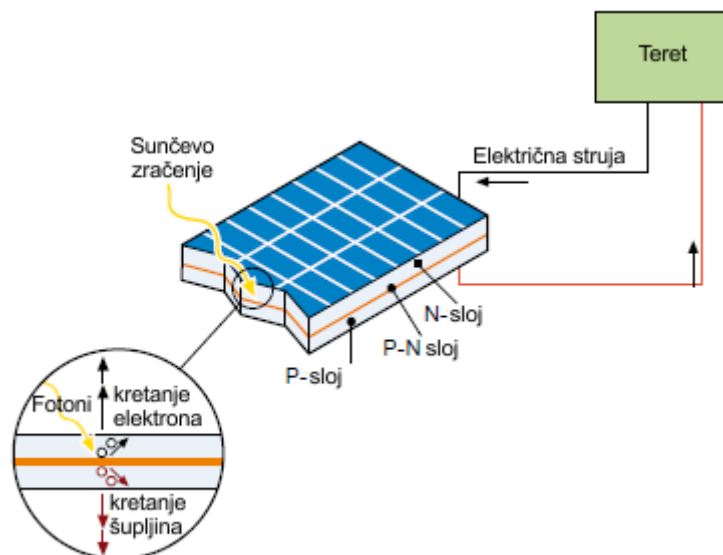


Slika 3.10. Fotonaponska ćelija. [8]

U međuprostoru između dva različito dopirana sloja (PN sloj), elektroni imaju tendenciju prelaska iz elektronima bogatog sloja (N sloj) u elektronima siromašan sloj (P sloj), što uzrokuje nakupljanje negativnog naboja u P sloju. Istovjetan fenomen sa šupljinama uzrokuje nakupljanje pozitivnog naboja u N sloju. Posljedično prethodno opisanim fenomenima se stvara električno polje u PN sloju koje se protivi daljnjem gibanju električnih naboja. Ukoliko na poluvodič narinemo vanjski napon situacija u PN sloju omogućuje protok struje u samo jednom smjeru (dioda).

Kad je fotonaponska ćelija izložena Sunčevom zračenju, zahvaljujući fotonaponskom efektu, u N – sloju i P – sloju nastaju parovi elektron – šupljina. Unutarnje električno polje omogućuje odvajanje elektrona od šupljina i usmjerava ih u suprotnim smjerovima. Jednom kad elektroni napuste osiromašeni sloj (PN – sloj) ne mogu se vratiti natrag dok djeluje električno polje koje ih sprječava da se gibaju u suprotnom smjeru. Spajanjem ćelije s vanjskim vodom se dobiva

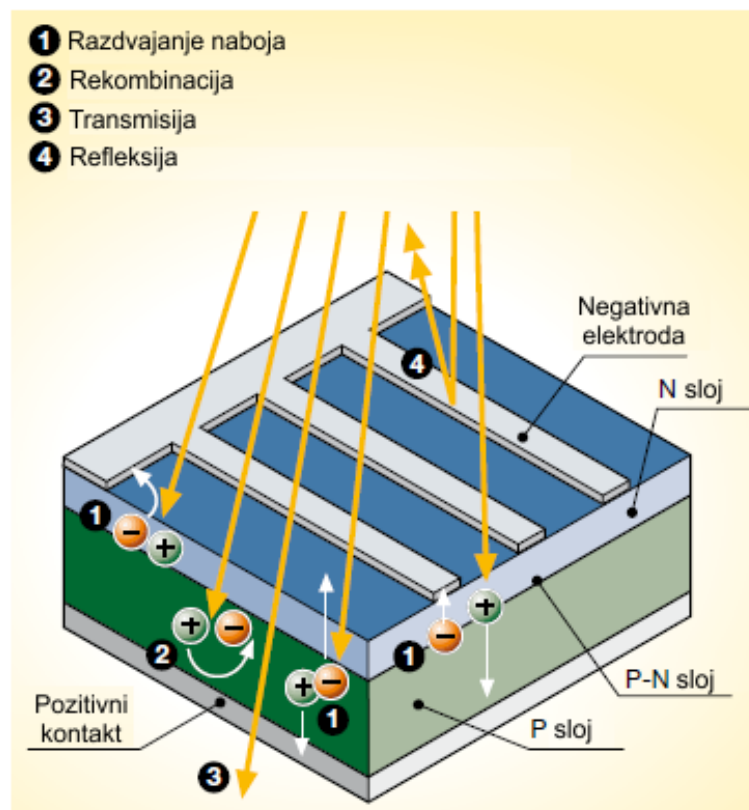
zatvoreni krug u kojem električna struja teče od N – sloja, koji ima veći električni potencijal, prema P – sloju, koji ima manji električni potencijal, dok je god fotonaponska ćelija izložena sunčevom zračenju, prikazano na *slici 3.11.*



Slika 3.11. Princip rada fotonaponske ćelije. [8]

Sloj silicija koji omogućava stvaranje električne energije je sloj koji okružuje P – N sloj. Električni naboji se stvaraju i u ostalim slojevima, ali kako u njima ne postoji električno polje koje uzrokuje kretanje naboja oni se rekombiniraju. Slobodni smo iz prethodnoga zaključiti da je važno da fotonaponska ćelija ima što je moguće veću površinu jer što je veća površina, to je veće stvaranje električne struje.

Na *slici 3.12.* je prikazano djelovanje fotonaponskog efekta, što pokazuje znatan dio sunčeve energije koja dopire do fotonaponske ćelije i koja se ne pretvara se u električnu energiju.



Slika 3.12. Fotonaponski efekt. [8]

100 % sunčevog zračenja koje dopire do fotonaponske ćelije

- 3 % gubitaka zbog refleksije
- 23 % fotona s velikom valnom duljinom, s nedovoljnom energijom za oslobađanje elektrona; zagrijavanje
- 32 % fotona s malom valnom duljinom, s viškom energije (transmisija)
- 8.5 % rekombinacija slobodnih nosioca naboja
- 20 % električni gradijent u fotonaponskoj ćeliji, prije svega u tranzicijskim slojevima
- 0.5 % otpora u seriji, što predstavlja gubitke na vodičima

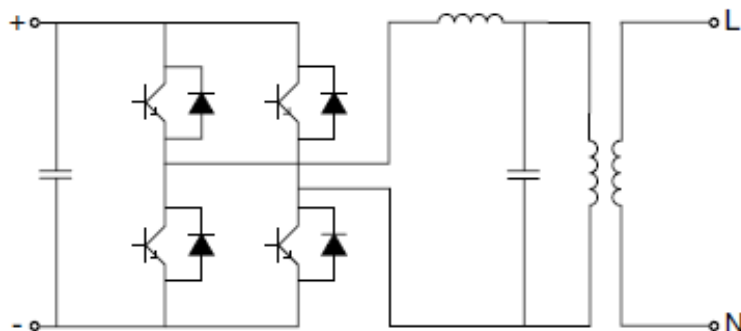
= 13 % iskoristive sunčeve energije

Pri *standardnim tehničkim uvjetima (STU)* (1 W/m^2 ozračenosti, pri temperaturi od $25 \text{ }^\circ\text{C}$) fotonaponska ćelija proizvodi oko 3 A s naponom od 0,5 V, vršne snage između 1,5 i 1,7 W.

Na tržištu postoje fotonaponski moduli koje tvore više povezanih fotonaponskih ćelija. Najčešći su fotonaponski moduli koje tvore 36 fotonaponskih ćelija u 4 paralelna reda, serijski povezana, površine između $0,5$ i 1 m^2 .

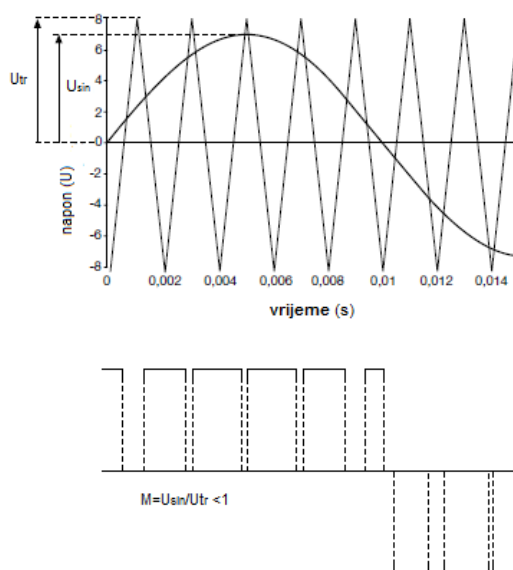
3.2.3.2. Inverter

Sustav napajanja i kontrole je sadržan u inverteru koji pretvara istosmjernu struju u izmjeničnu te kontrolira kvalitetu izlazne snage koju generator isporučuje u mrežu. Inverter radi na principu LC filtra unutar samog pretvarača. *Slika 3.13.* prikazuje principijelnu shemu jednofaznog invertera. Tranzistori, koji se koriste kao statičke sklopke, u najjednostavnijem obliku omogućuju pravokutni izlazni signal.



Slika 3.13. Principijelna shema jednofaznog invertera. [8]

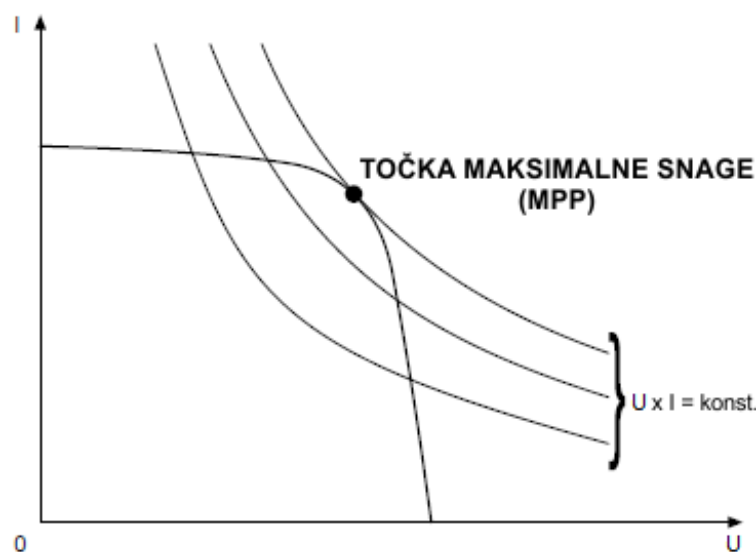
Za dobivanje sinusnog oblika izlaznog signala se koristi sofisticiranija tehnologija – *pulsno širinska modulacija*. Pulsno širinska modulacija je tehnologija koja omogućuje dobivanje izlaznog signala određene frekvencije i efektivne vrijednosti, prikazano na *slici 3.14.*



Slika 3.14. Princip upravljanja pulsno širinskom modulacijom. [8]

Snaga koju fotonaponski generator isporučuje ovisi o mjestu i vrsti upotrebe fotonaponskog modula. Kako bi se maksimizirala energetska učinkovitost sustava, fotonaponski generator mora biti prilagođen opterećenju kako bi radna točka fotonaponskog generatora uvijek odgovarala *točki maksimalne snage* (eng. maximum power point – *MPP*).

U tu svrhu se po principu trenutak po trenutak računa struja – naponska vrijednost fotonaponskog generatora po kojoj se proizvodi maksimalna snaga. $U - I$ karakteristika fotonaponskog generatora, prikazana na *slici 3.15.*, je polazište ovog procesa.



Slika 3.15. *MPP točka fotonaponskog generatora.* [8]

Zbog različitih traženih uvjeta rada inverteri za samostojeće fotonaponska sustave i fotonaponska sustave spojene na mrežu imaju različite karakteristike:

- u samostojećim fotonaponskim sustavima inverteri trebaju, koliko je moguće, izmjeničnu stranu održavati konstantnom te usklađenom s mogućnošću proizvodnje električne energije na fotonaponskom generatoru, s jedne strane i potrebama opterećenja, s druge strane;
- u fotonaponskim sustavima spojenima na mrežu inverteri trebaju, koliko je moguće, istovremeno oponašati mrežni napon na izlazu fotonaponskog generatora te održavati radnu točku fotonaponskog generatora što bliže točki maksimalne snage (*MPP* točki).

3.2.4. Vrste fotonaponskih sustava

Samostojeći fotonaponski sustavi, prikazani na *slici 3.16.*, su sustavi koja nisu priključena na mrežu i sastoje se od fotonaponskih modula i sustava za pohranu električne energije, što jamči opskrbu električnom energijom i kada je osvjetljenje slabo ili kada je mrak. Budući da fotonaponski generator isporučuje istosmjernu električnu energiju, ukoliko je korisniku fotonaponskog sustava potrebna izmjenična električna energija inverter postaje neizbježan.



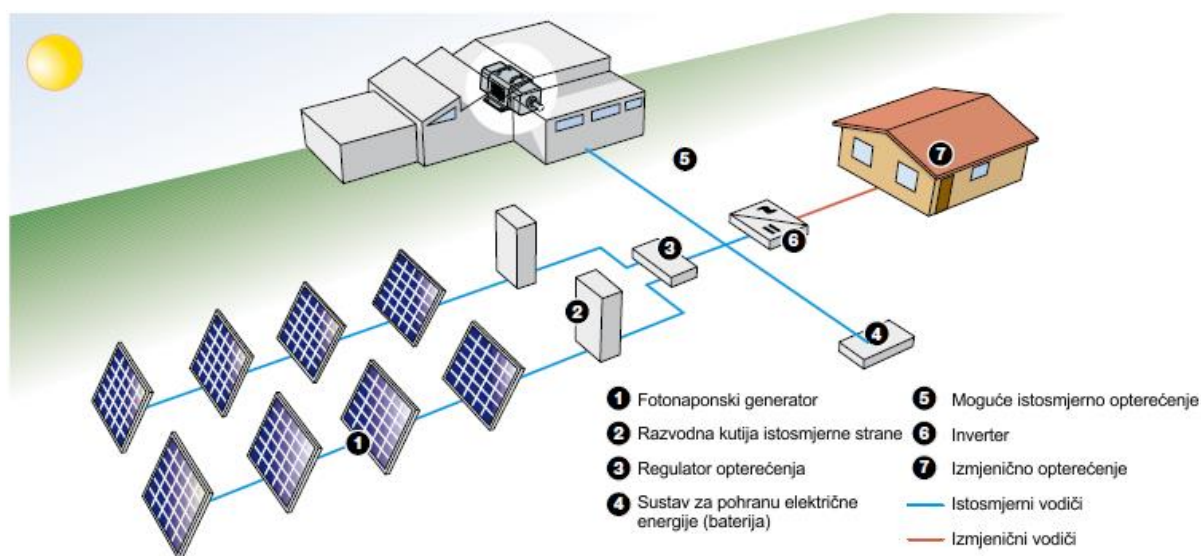
Slika 3.16. *Primjeri samostojećih fotonaponskih sustava.* [8]

Samostojeći fotonaponski sustavi su u prednosti, s tehničkog i financijskog aspekta, kada na mjestu gdje se javlja potreba električna mreža nije dostupna ili kada je do nje teško doći, onda samostojeći sustavi zamjenjuju motorne agregate (generatore električne energije). Osim toga, samostojeći sustavi imaju predimenzionirano fotonaponsko područje tako da za vrijeme dobre ozračenosti osiguravaju istovremenu trenutnu opskrbu električnom energijom i punjenje sustava za pohranu električne energije što jamči dostupnost električne energije i u danima loše ozračenosti.

Neki od načina upotrebe samostojećih fotonaponskih sustava su:

- napajanje crpne stanice za vodu;
- napajanje radio repetitora, stanica za promatranje vremenskih prilika ili seizmičke aktivnosti te osiguravanje prijenosa podataka s takvih stanica u baze;
- napajanje svjetlećih znakova na cesti, u pomorskim i zračnim lukama;
- osiguravanje električne energije za kampere;
- napajanje oglasnih površina;
- napajanje skloništa za planinare na velikim visinama.

Slika 3.17. prikazuje princip rada samostojećeg fotonaponskog sustava.



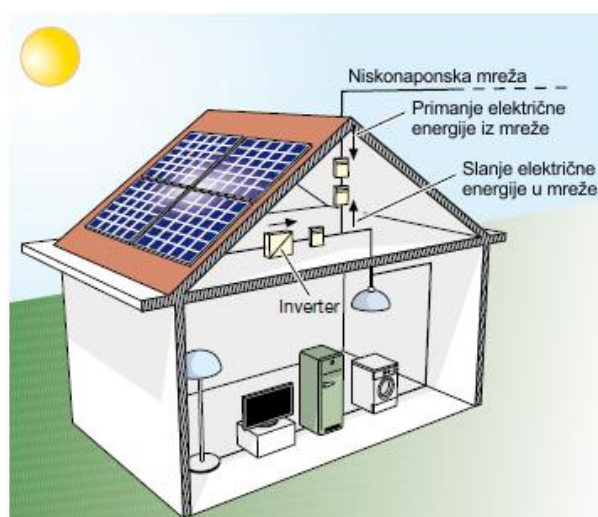
Slika 3.17. Princip rada samostojećeg fotonaponskog sustava. [8]

Fotonaponski sustav trajno spojen na mrežu, prikazano na *slici 3.18.*, koristi električnu energiju mreže tijekom vremena kada fotonaponski generator ne može proizvesti dovoljno električne energije da zadovolji potrebe potrošača. Također, ukoliko fotonaponski generator proizvodi višak električne energije u odnosu na potrebe potrošača, višak električne energije se isporučuje u mrežu koja u tom slučaju može djelovati kao veliki akumulator (baterija), stoga fotonaponski sustavi spojeni na mrežu ne trebaju sustav za pohranu električne energije.



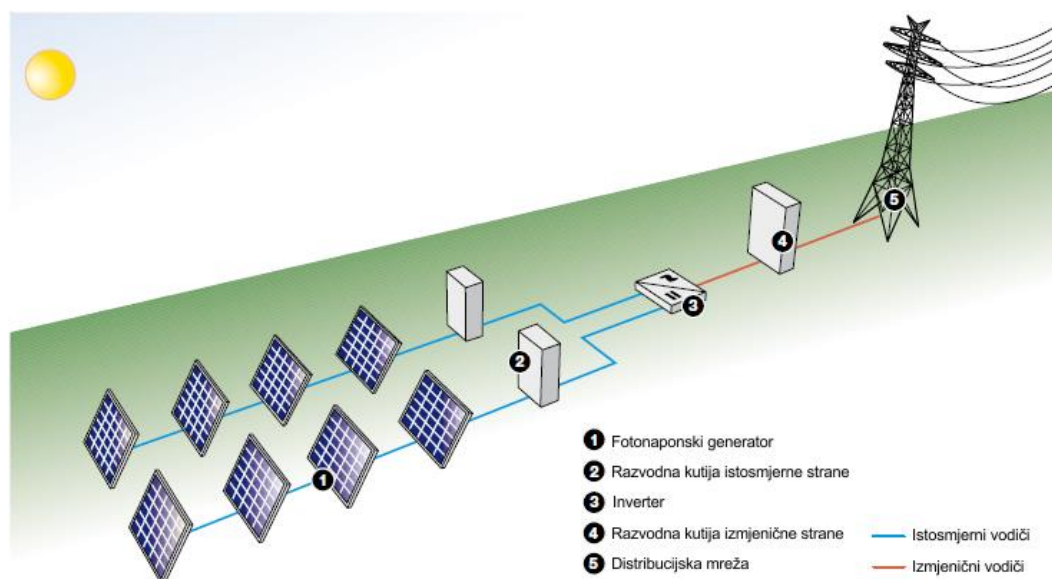
Slika 3.18. *Primjeri fotonaponskih sustava spojenih na mrežu.* [8]

Ovakvi sustavi, prikazana na *slici 3.19.* ističu važnost distribucije umjesto proizvodnje – električna energija proizvedena u blizini područja potrošnje ima veću vrijednost od električne energije proizvedene u tradicionalnim velikim elektranama jer nema gubitke zbog prijenosa električne energije pa su troškovi distribucije električne energije smanjeni. Osim toga, proizvodnja električne energije u satima visoke ozračenosti, tijekom dana, omogućuje smanjenje opterećenja za mrežu, kada je potrošnja električne energije najveća.



Slika 3.19. *Fotonaponski sustav spojen na mrežu.* [8]

Slika 3.20. prikazuje princip rada fotonaponskog sustava spojenog na mrežu.



Slika 3.20. Princip rada fotonaponskog sustava spojenog na mrežu. [8]

3.2.5. Naponi i struje u fotonaponskom sustavu

Da bi se postigla potrebna vršna snaga, fotonaponski moduli se električno povezuju u seriju kako bi tvorili fotonaponske nizove koji se spajaju paralelno.

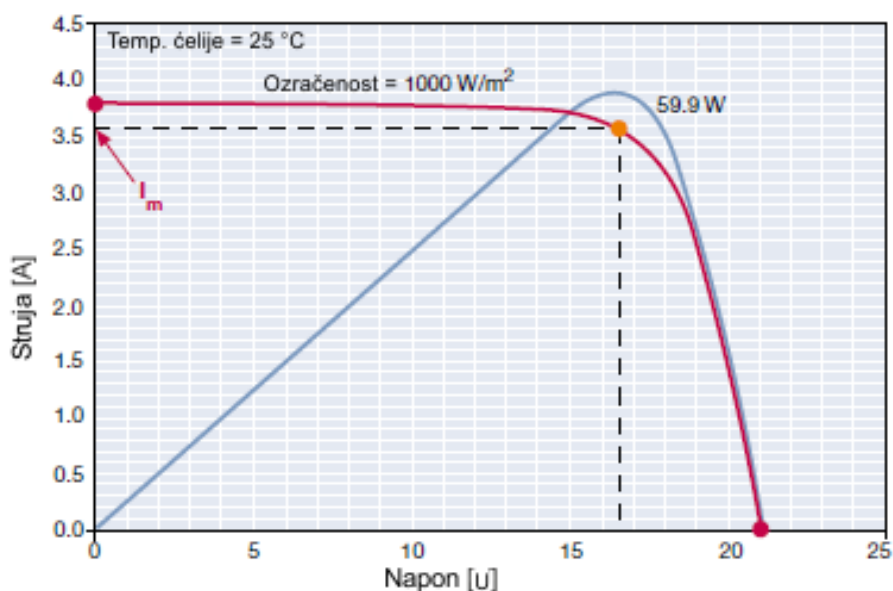
Najveći broj fotonaponskih modula (što znači i najveći proizvedeni napon) koje mogu biti serijski povezane u fotonaponske nizove je određen rasponom rada invertera te sigurnosnim zahtjevima kako se sigurnost opreme i ljudi ne bi dovela u pitanje.

Konkretno, napon invertera zbog učinkovitosti ovisi o vlastitoj snazi te se zbog toga za invertore nazivne snage manje od 10 kW najčešće koristi raspon napona 250 – 750 V, a za invertore nazivne snage veće od 10 kW raspon napona 500 – 900 V.

3.3. Strujno – naponska karakteristika fotonaponskog modula

Strujno – naponska karakteristika fotonaponskog modula je prikazana na slici 3.21.. Pri uvjetima kratkog spoja proizvedena struja ima najvišu vrijednost (I_{ks}), dok pri uvjetima praznog hoda najvišu vrijednosti ima napon (U_{ph}). Proizvedena snaga (P) pri uvjetima kratkog spoja ili

pri uvjetima praznog hoda ima vrijednost nula, dok za sve ostale uvjete proizvedena snaga raste kako raste vrijednost napona; od vrijednosti nula proizvedena snaga raste do najviše vrijednosti (P_{mpp}) te ponovno, nakon postizanja najviše vrijednosti, naglo pada na vrijednost nula.



Slika 3.21. Strujno – naponska karakteristika fotonaponskog modula. [8]

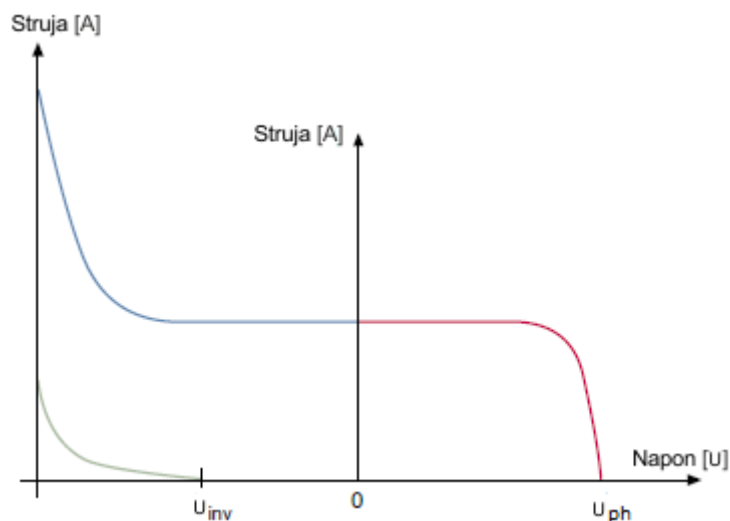
Dakle, karakteristični podaci fotonaponskih modula se mogu sažeti kako slijedi:

- I_{ks} – struja kratkog spoja;
- U_{ph} – napon praznog hoda;
- P_{mpp} – najviša snaga proizvedena pri *standardnim tehničkim uvjetima* (STU);
- I_{mpp} – struja proizvedena na točki maksimalne snage;
- U_{mpp} – napon proizveden na točki maksimalne snage;

FF (*faktor punjenja*) je parametar koji određuje oblik strujno – naponske karakteristike; odnos između maksimalne snage i umnoška napona praznog hoda i struje kratkog spoja ($U_{ph} \cdot I_{ks}$).

Kada se vanjski napon na fotonaponsku ćeliju narine u smjeru suprotnom u odnosu na standardne uvjete, proizvedena struja ostaje konstantna te se snaga apsorbira unutar same fotonaponske ćelije. Ukoliko narinuti napon preraste određenu vrijednost (napon kvara), P – N sloj se perforira, kao što se inače događa u diodama, a struja dosegne vrlo visoke vrijednosti te na taj način ošteti fotonaponsku ćeliju. U nedostatku osvjetljenja fotonaponske ćelije, proizvedena

struja ima vrijednost nula za vrijednosti napona suprotnog smjera u odnosu na standardne tehničke uvjete do vrijednosti napona kvara, nakon čega struja poprima vrijednosti slične vrijednostima pri uvjetima dobre osvjetljenosti fotonaponske ćelije (*slika 3.22.* – krajnje lijevi dio karakteristike).



Slika 3.22. Prikaz efekta diode unutar fotonaponske ćelije. [8]

3.4. Strujni krug ekvivalentan fotonaponskoj ćeliji

Fotonaponska ćelija se može smatrati generatorom električne energije i može se predstaviti ekvivalentnim krugom, prikazanim na *slici 3.23.*

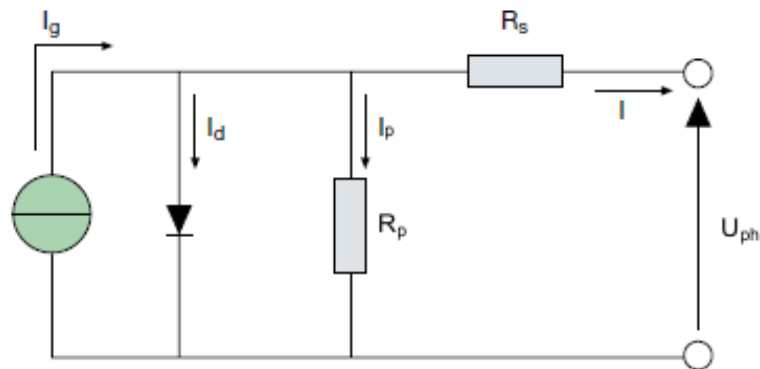
Struja I na izlaznim stezaljkama fotonaponske ćelije je jednaka struji generatora proizvedenoj fotonaponskim efektom I_g , za slučaj idealnog strujnog izvora, umanjenoj za struju diode I_d i struju propuštanja I_p .

Serijski otpor R_s predstavlja unutarnji fotonaponski otpor protoku proizvedene struje te ovisi o debljini P – N spoja, nečistoćama i kontaktnom otporu.

Otpor propuštanja R_p obuhvaća struju propuštanja pri normalnim uvjetima rada.

U idealnoj fotonaponskoj ćeliji bismo imali vrijednosti $R_s = 0$ i $R_p = \infty$, međutim u visokokvalitetnim silicijskim fotonaponskim ćelijama imamo realne vrijednosti $R_s = 0,05 - 0,10 \, \Omega$ i $R_p = 0,2 - 0,33 \, m\Omega$. Na učinkovitost pretvorbe fotonaponske ćelije uvelike utječe

makar mala promjena vrijednosti serijskog otpora R_s , dok promjena vrijednosti otpora propuštanja R_p , u odnosu na serijski otpor, manje utječe na učinkovitost fotonaponske ćelije.



Slika 3.23. Ekvivalentni strujni krug fotonaponske ćelije. [8]

Napon praznog hoda U_{ph} je moguće očitati kada kroz teret ne prolazi nikakva vrijednost struje ($I = 0$) i dan je formulom:

$$U_{ph} = I_p \cdot R_p.$$

Struja diode I_d je dana uobičajenom formulom za istosmjernu struju:

$$I_d = I_D \cdot \left[e^{\frac{Q \cdot U_{ph}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right];$$

gdje je:

- I_D – struja zasićenja diode;
- Q – naboj elektrona ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C);
- A – faktor diode koji ovisi o faktorima rekombinacije unutar same diode;
- k – Boltzmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$);
- T – apsolutna temperatura u Kelvinima (K).

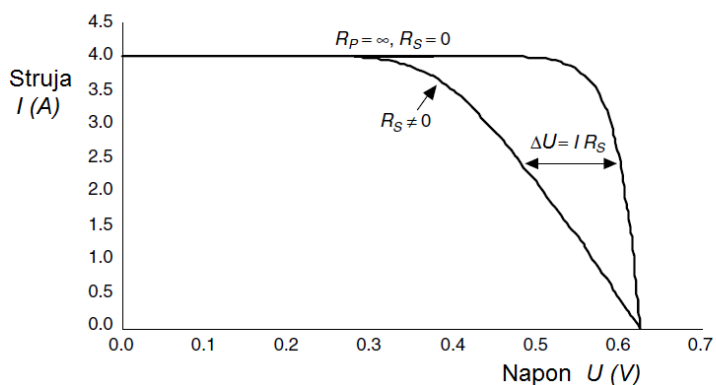
Struja I na izlaznim stezaljkama fotonaponske ćelije je dana formulom:

$$I = I_g - I_d - I_p = I_g - I_D \cdot \left[e^{\frac{Q \cdot U_{ph}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{U_{ph}}{R_p}.$$

U uobičajenim fotonaponskim ćelijama je struja propuštanja I_p zanemariva u odnosu na preostale dvije struje. Stoga se struja zasićenja diode I_D može eksperimentalno odrediti na način

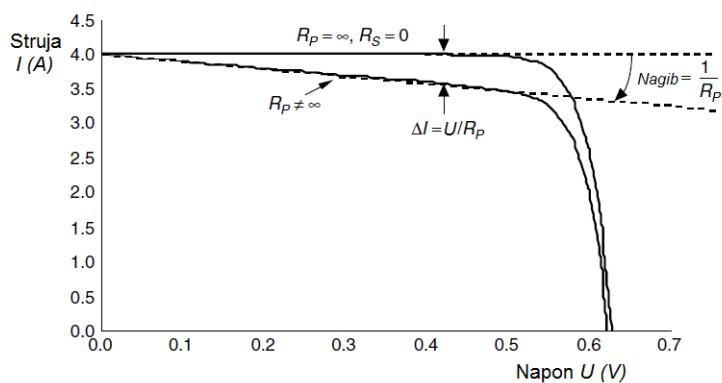
da se dovede napon praznog hoda U_{ph} na neosvijetljenju fotonaponsku ćeliju te se nakon toga izmjeri struja koja proteče fotonaponskom ćelijom.

Slika 3.24. prikazuje kako otpor R_S u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije utječe na izgled U-I karakteristike [9].



Slika 3.24. Utjecaj otpora R_S u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije na izgled U-I karakteristike.

Slika 3.25. prikazuje kako otpor R_P u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije utječe na izgled U-I karakteristike [9].

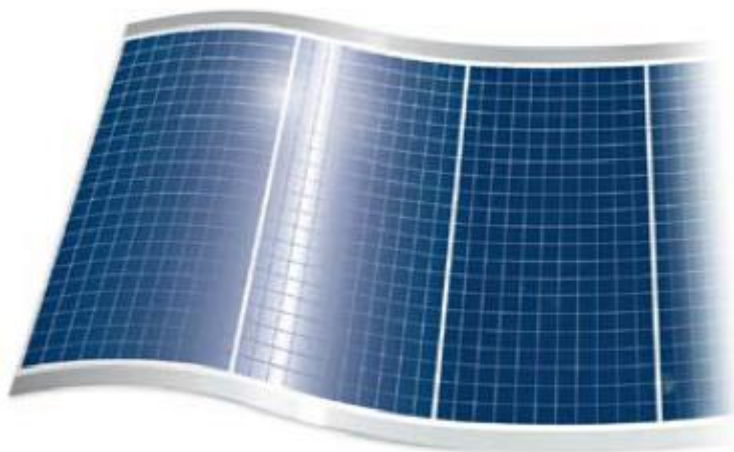


Slika 3.25. Utjecaj otpora R_P u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije na oblik U-I karakteristike.

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

4.1. Vrste tankoslojnih fotonaponskih modula

Tankoslojni fotonaponski moduli, prikazani na *slici 4.1.*, su izrađeni od poluvodičkih materijala, obično kao mješavina različitih plinova, postavljenih na nosače kao što su staklo, polimer ili aluminij, koji daju fizičku čvrstoću fotonaponske ćelije. Poluvodički sloj tankoslojnih fotonaponskih modula je debeo nekoliko μm , dok je kod kristalnih silicijskih ploča taj sloj debeo nekoliko stotina μm . Debljina poluvodičkog sloja od nekoliko μm rezultira ogromnim uštedama sirovine pri proizvodnom procesu te posebnom upotrebljivošću tankoslojnih fotonaponskih modula u odnosu na ostale tehnologije proizvodnje fotonaponskih modula.



Slika 4.1. Tankoslojni fotonaponski modul

Tržišni udio tehnologija tankoslojnih fotonaponskih modula je još uvijek vrlo ograničen ($\approx 7\%$), ali predstavljaju tehnološka rješenja koja se jedina mogu uzeti u obzir za dugoročno smanjenje cijena proizvodnje fotonaponskih modula u budućnosti.

Materijali koji se koriste pri izradi tankoslojnih fotonaponskih modula su:

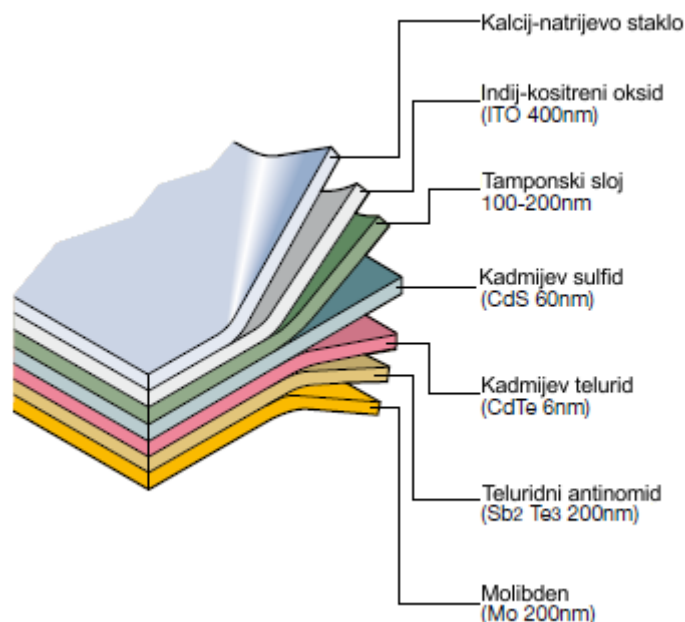
- amorfni silicij;
- CdTeS (kadmijev telurid – kadmijev sulfid);
- GaAs (galijev arsenid);
- CIS, CIGS i CIGSS (legure bakrenog iridija).

4.1.1. a-SI tankoslojni fotonaponski moduli

Amorfni silicij (*a-SI*), kao potpora leguri npr. aluminijsa pri izradi tankoslojnih fotonaponskih ćelija, omogućava jeftinije postizanje fotonaponskog efekta, ali ima lošija svojstva od skuplje tehnologije izrade fotonaponskih ćelija od kristalnog silicija jer se učinkovitost tankoslojnih fotonaponskih ćelija protekom vremena smanjuje brže nego kod kristalnih silicijskih fotonaponskih ćelija. Amorfni silicij se može „poprskati“ po tankim pločama od plastičnog ili fleksibilnog materijala. Tehnologija prskanja amornog silicija po tankim pločama se koristi kad je potrebno što je više moguće smanjiti težinu tankoslojnog fotonaponskog modula ili kad ju je potrebno prilagoditi zakrivljenim površinama. Učinkovitost tankoslojnih fotonaponskih ćelija od amornog silicija (5 – 6 %) je vrlo mala zbog brojnih otpora koje elektroni moraju svladati pri realizaciji fotonaponskog efekta. Zanimljiva aplikacija ove tehnologije je *tandem tehnologija*, kada se sloj amornog silicija kombinira s jednim ili više slojeva kristalnog silicija, što omogućava veću učinkovitost i veću dugotrajnost fotonaponskih modula.

4.1.2. CdTeS tankoslojni fotonaponski moduli

CdTeS tankoslojne fotonaponske ćelije, prikazane na *slici 4.2.*, se sastoje od jednog P – sloja (CdTe) i jednog N – sloja (CdS) koji tvoje PN – sloj.



Slika 4.2. Struktura CdTeS tankoslojne fotonaponske ćelije.

CdTeS tankoslojne fotonaponske ćelije imaju veću učinkovitost od tankoslojnih fotonaponskih ćelija od amorfne silicija, 10 – 11 % u industrijskim proizvodima te 15,8 % u laboratorijskim testiranjima. Industrijska proizvodnja CdTeS tankoslojnih fotonaponskih ćelija uzrokuje probleme zaštite okoliša jer u sebi sadrži kadmijev telurid (CdTe) koji nije topljiv u vodi, što je izraženije kod ovog spoja nego kod ostalih kadmijevih spojeva. Osobito nepravilno korištenje i recikliranje kadmijeva telurida može uzrokovati velike probleme

4.1.3. GaAs tankoslojni fotonaponski moduli

Tehnologija izrade GaAs tankoslojnih fotonaponskih ćelija je najzanimljivija zbog vrlo visoke učinkovitosti koju postiže, više od 25 – 30 %, ali je proizvodnja takvih ćelija problematična zbog izrazito visoke cijene te izraženog nedostatka sirovina na tržištu. Koristi se za izradu super brzih poluvodiča i u optoelektroničkoj industriji. Najveća upotreba GaAs tankoslojnih fotonaponskih modula je u svemirskoj industriji gdje težina i veličina konačnog proizvoda igraju veliku ulogu.

4.1.4. CIS/CIGS/CIGSS tankoslojni fotonaponski moduli

CIS/CIGS/CIGSS tankoslojni fotonaponski moduli su dio fotonaponske tehnologije koja je još uvijek u fazi istraživanja i koja je još uvijek u razvoju. Silicij se u ovoj tehnologiji izrade tankoslojnih fotonaponskih modula mijenja posebnim legurama kao što su:

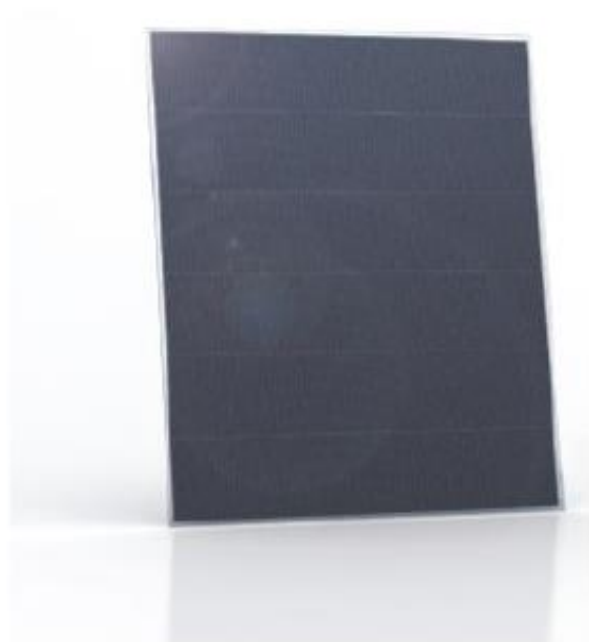
- bakar, indij i selenit (CIS);
- bakar, indij, galij i selenit (CIGS);
- bakar, indij, galij, selenit i sumpor (CIGSS).

Trenutna učinkovitost ove tehnologije je 10 – 11 % te ostaje stalnom tijekom cijelog životnog vijeka CIS/CIGS/CIGSS tankoslojnih fotonaponskih modula, kao i kod kristalnih silicijskih fotonaponskih modula, dok je cijena proizvodnje ovakvih tankoslojnih fotonaponskih modula manja u odnosu na cijenu proizvodnje kristalnih silicijskih fotonaponskih modula.

4.2. Karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula

Laboratorij za obnovljive izvore energije posjeduje pet različitih tehnologija fotonaponskih modula, a za potrebe mjerenja i izradu ovog rada koristili smo tankoslojnu tehnologiju. U ovom poglavlju opisane su tehničke karakteristike korištenih tankoslojnih fotonaponskih modula.

4.2.1. MASDAR MPV100-S



Slika 4.3. Izgled fotonaponskog modula tankoslojne tehnologije, MASDAR MPV100-S

Tehničke karakteristike prema STU-u za *MASDAR MPV100-S*:

- $P = 100 \text{ W}$;
- $\eta_{\text{ploče}} = 7 \%$;
- dimenzije: 1.300 mm x 1.100 mm x 34 mm;
- masa: 29,5 kg.

Tablica 4.1. Tehničke specifikacije tankoslojnog modula MASDAR MPV100-S pri temperaturi od 25°C.

zračenje	$I_{ks}(A)$	$U_{ph}(V)$	$I_{mpp}(A)$	$U_{mpp}(V)$
1.000 W/m²	1,58	96	1,34	75

4.2.2. SOLAR FRONTIER SF-150



Slika 4.4. Izgled fotonaponskog modula tankoslojne tehnologije, SOLAR FRONTIER SF-150

Tehničke karakteristike prema STU-u za *SOLAR FRONTIER SF-150*:

- $P = 150 \text{ W}$;
- $\eta_{\text{ploče}} = 12.2 \%$;
- dimenzije: 1257 mm x 977 mm x 35 mm;
- masa: 20 kg.

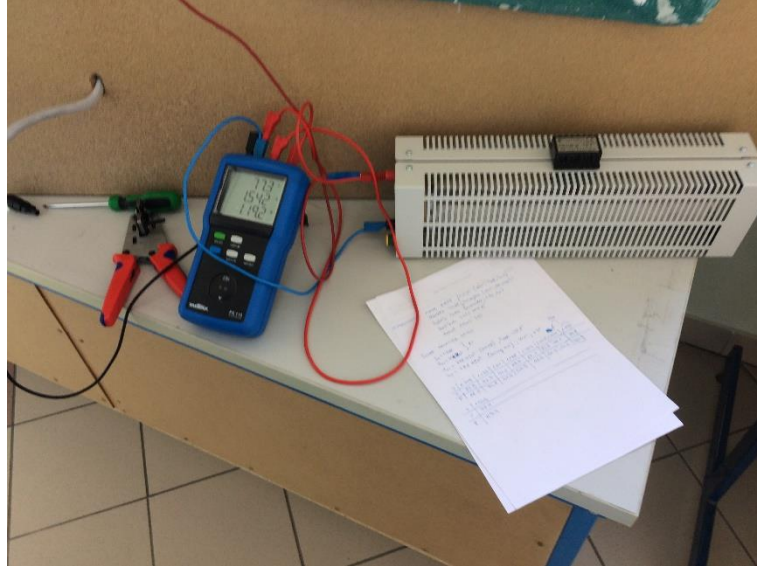
Tablica 4.2. Tehničke specifikacije tankoslojnog modula SOLAR FRONTIER SF-150 pri temperaturi od 25°C.

zračenje	$I_{ks}(A)$	$U_{ph}(V)$	$I_{mpp}(A)$	$U_{mpp}(V)$
1.000 W/m²	2,10	110	1,90	79
800 W/m²	1,69	108,6	1,51	80
600 W/m²	1,26	106,7	1,13	80
400 W/m²	0,84	104,4	0,76	79
200 W/m²	0,43	100	0,38	78

4.3. Mjerni instrumenti

Mjerni instrumenti korišteni za izradu diplomskog rada su:

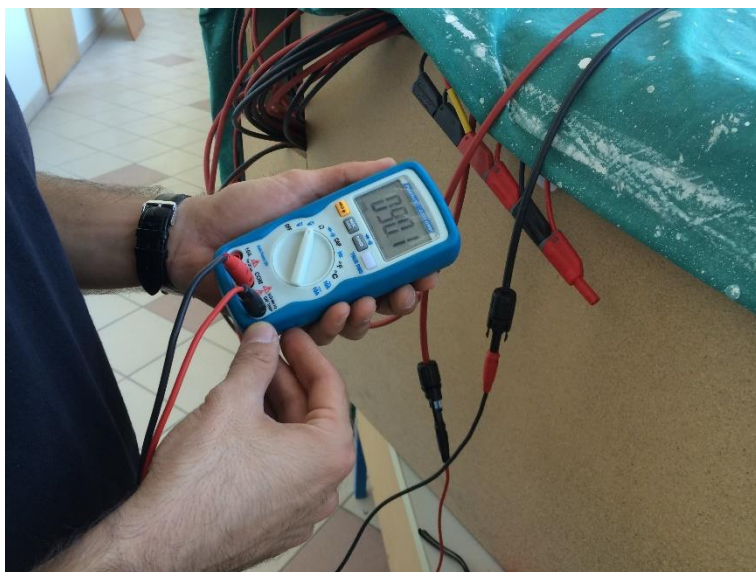
- **Metrix PX110 Powermeter**, kojim će se mjeriti struja I (A), napon U (V) i snagu P (W) fotonaponskih modula;



Slika 4.5. Mjerni instrument Metrix PX110 Powermeter prilikom obavljanja mjerenja.

Mjernim uređajem Metrix PX110 Powermeter smo zapravo mjerili U-I karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula koje smo mjerili za potrebe ovog rada.

- **PeakTech 3320 DMM**, kojim će se mjeriti struju kratkog spoja I_{ks} (A) i napon praznog hoda U_{ph} (V) fotonaponskih modula;



Slika 4.6. Mjerni instrument PeakTech 3320 DMM prilikom obavljanja mjerenja.

- **Seaward SOLAR Survey200**, kojim će se mjeriti ozračenost (W/m^2) i kut ($^\circ$) fotonaponskih modula te



Slika 4.7. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prilikom obavljanja mjerenja.

- **Metrel A1378**, kojim će se mjeriti ozračenosti (W/m^2) fotonaponskih modula.



Slika 4.8. Mjerni instrument Metrel A1378 prilikom obavljanja mjerenja.

4.4. Simulacija zasjenjenja

Zasjenjenja fotonaponskih modula korištenih za potrebe ovog rada su izvedena na način da je, prije ostalih mjerenja, mjerena karakteristika bez zasjenjenja, što je prikazano na *slici 4.9.*

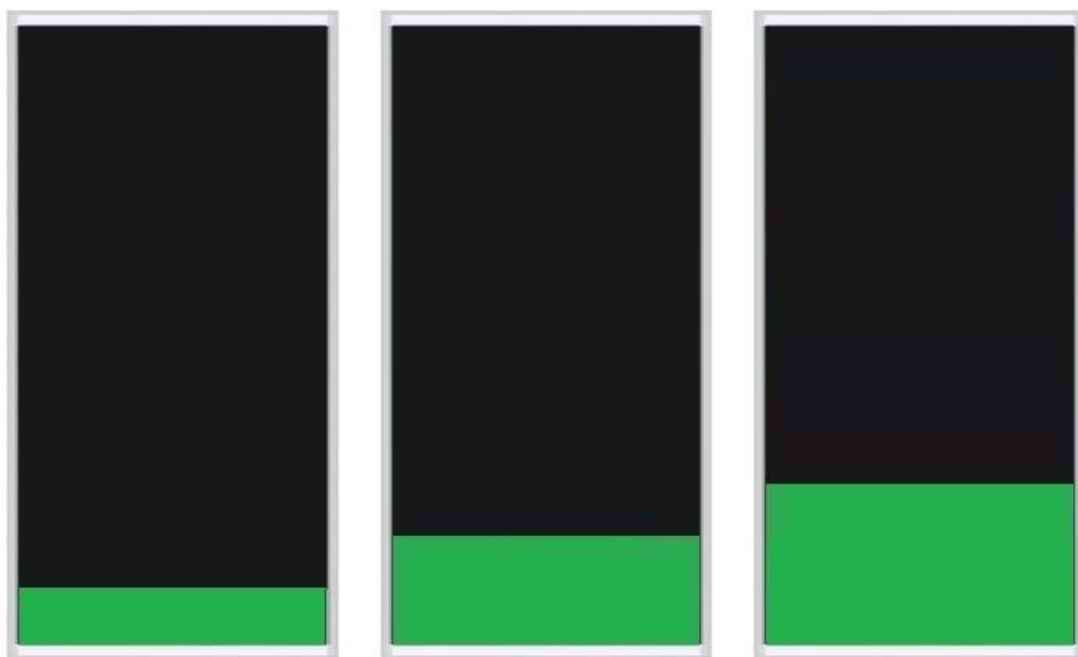


Slika 4.9. Fotonaponski modul pri normalnoj ozračenosti.

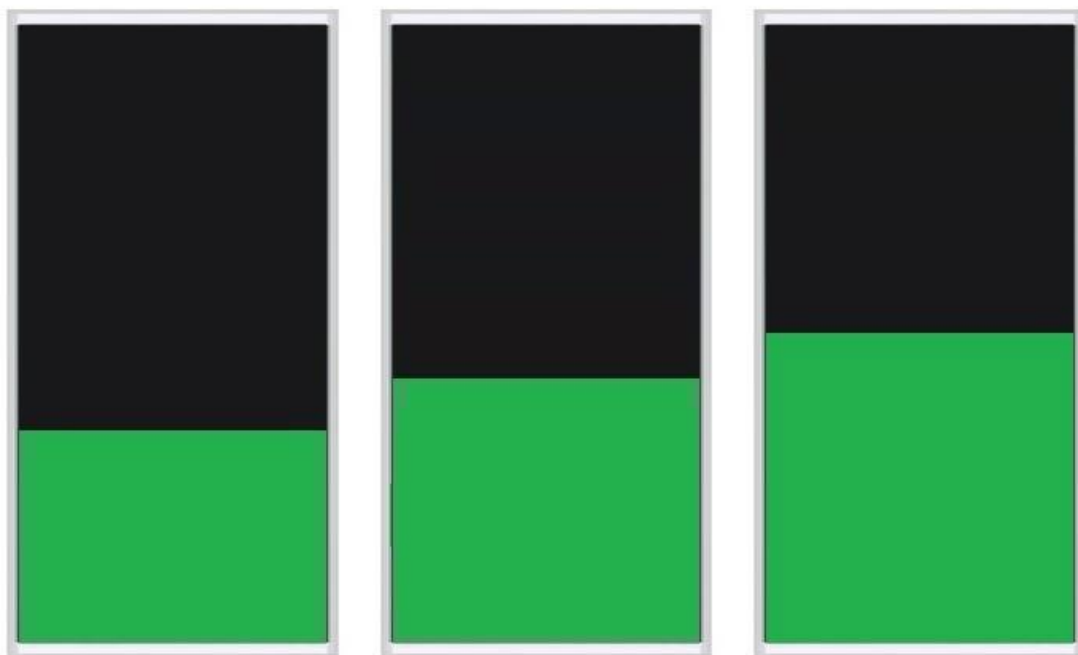


Slika 4.10. Tankoslojni fotonaponski modul pri normalnoj ozračenosti u trenutku obavljanja mjerenja.

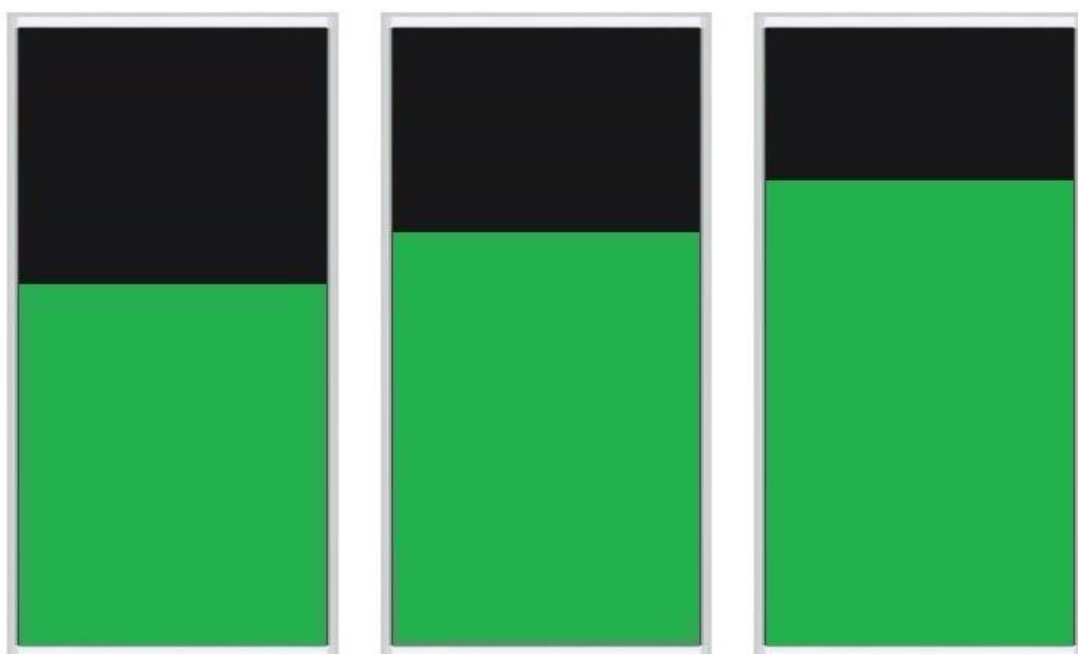
Također, mjerenja su obavljena simulacijom zasjenjenja fotonaponskih modula od njihovog donjeg ruba, i to redom zasjenjenje od 10 cm, zasjenjenje od 20 cm, zasjenjenje od 30 cm, sve do zasjenjenja od 110 cm. Simulacije zasjenjenja su prikazane na slikama kako slijedi, od slike 4.11. do slike 4.14..



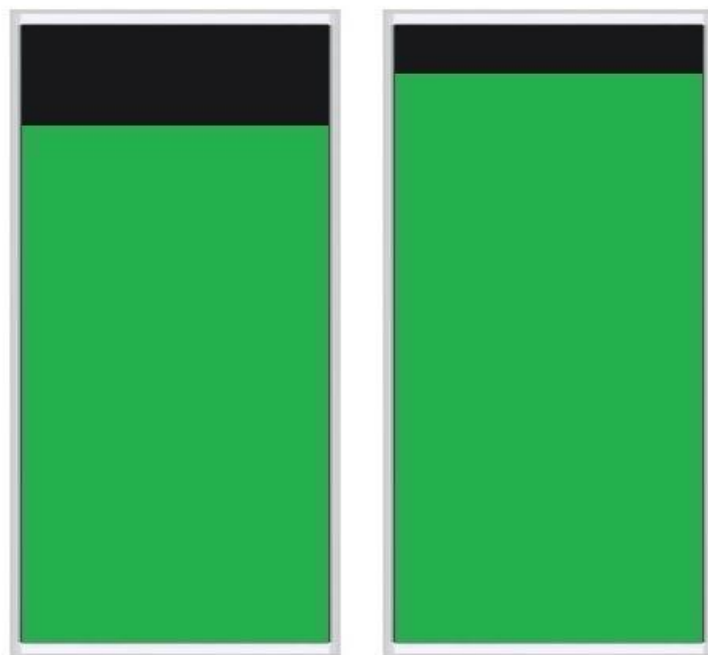
Slika 4.11. Fotonaponski modul pri zasjenjenjima od 10 cm, 20 cm i 30 cm.



Slika 4.12. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 40 cm, 50 cm i 60 cm.



Slika 4.13. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 70 cm, 80 cm i 90 cm.



Slika 4.14. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 100 cm i 110 cm.



Slika 4.15. Tankoslojni fotonaponski modul pri zasjenjenju od 70 cm u trenutku obavljanja mjerenja.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

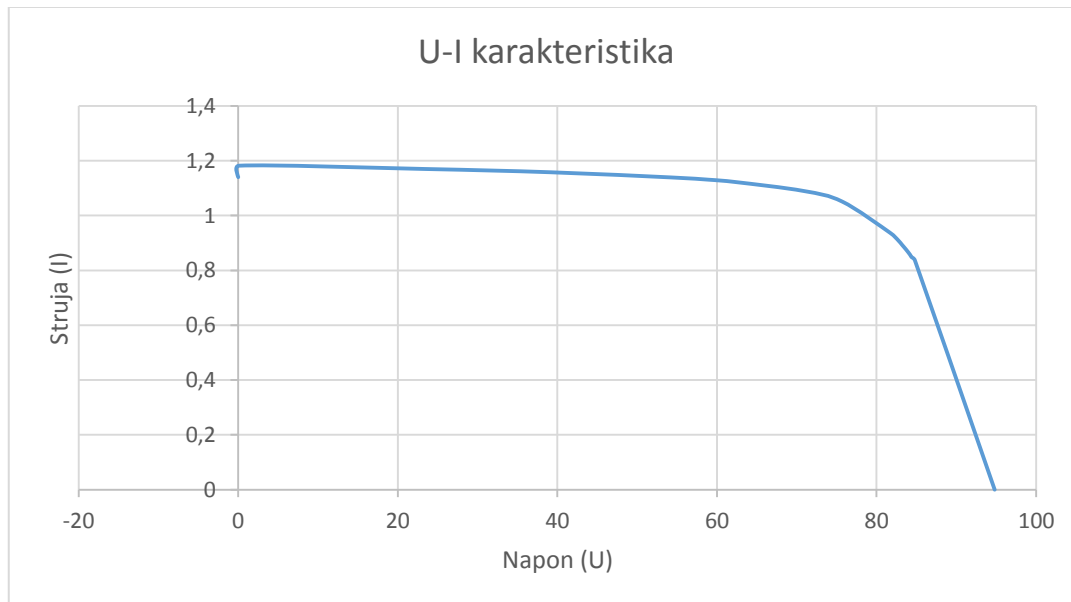
Rezultati provedenih istraživanja na fotonaponskim modulima MASDAR MPV100-S i SOLAR FRONTIER SF-150 su prikazani pomoću U-I karakteristika.

5.1. MASDAR MPV100-S

Slike od *slike 5.1.* do *slike 5.12.* prikazuju izmjerene U-I karakteristike fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

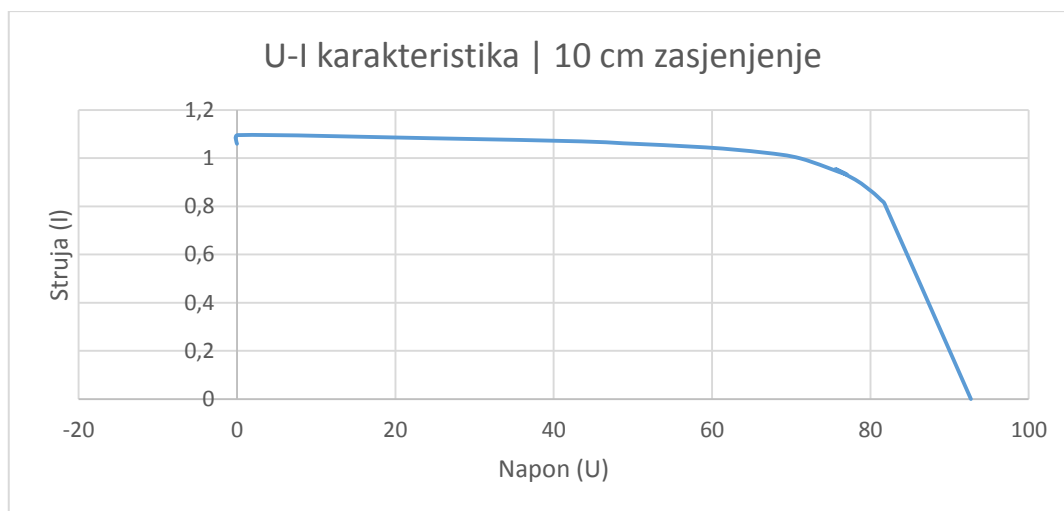
Na *slici 5.13.* su prikazane U-I karakteristike fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.

Prvo mjerenje je obavljeno bez zasjenjenja fotonaponskog modula. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 710 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 649 W/m^2 .



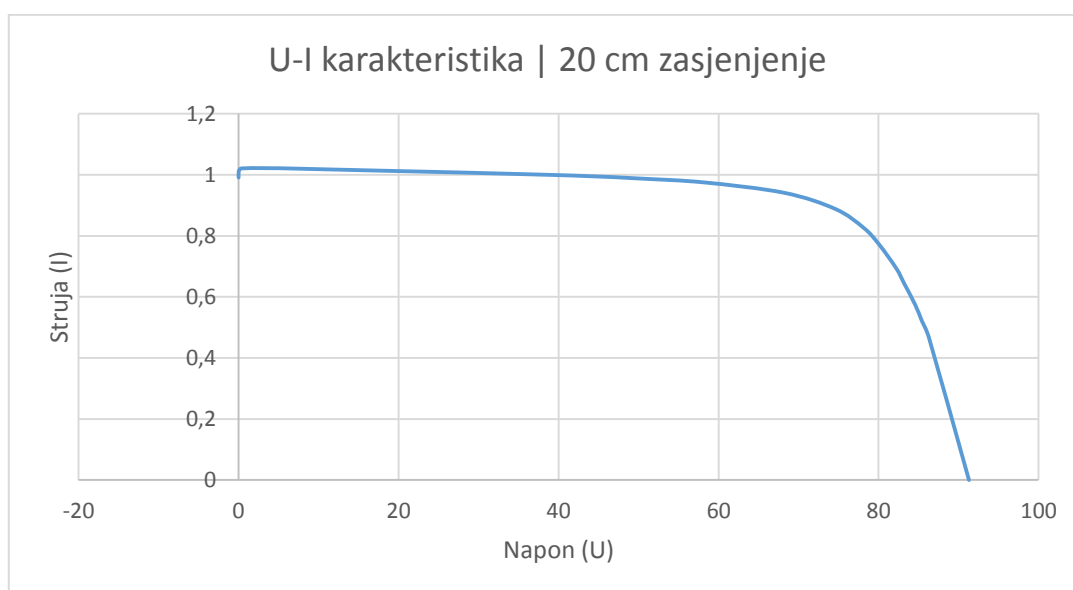
Slika 5.1. U-I karakteristika bez zasjenjenja fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

Drugo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 10 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 724 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 663 W/m^2 .



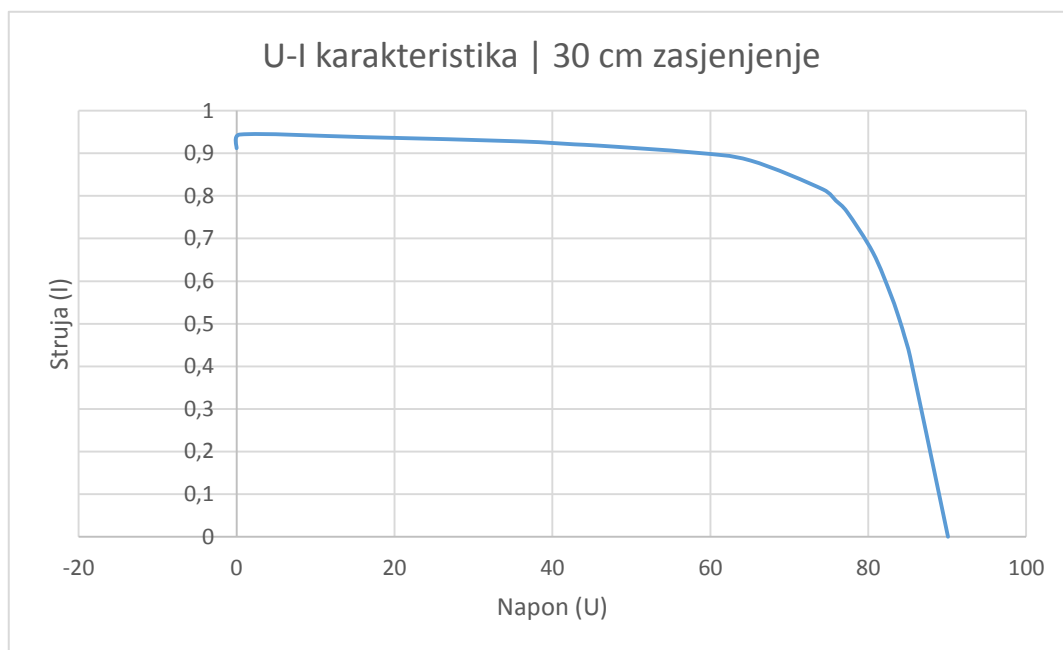
Slika 5.2. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 10 cm.

Treće mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 20 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 728 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 665 W/m^2 .



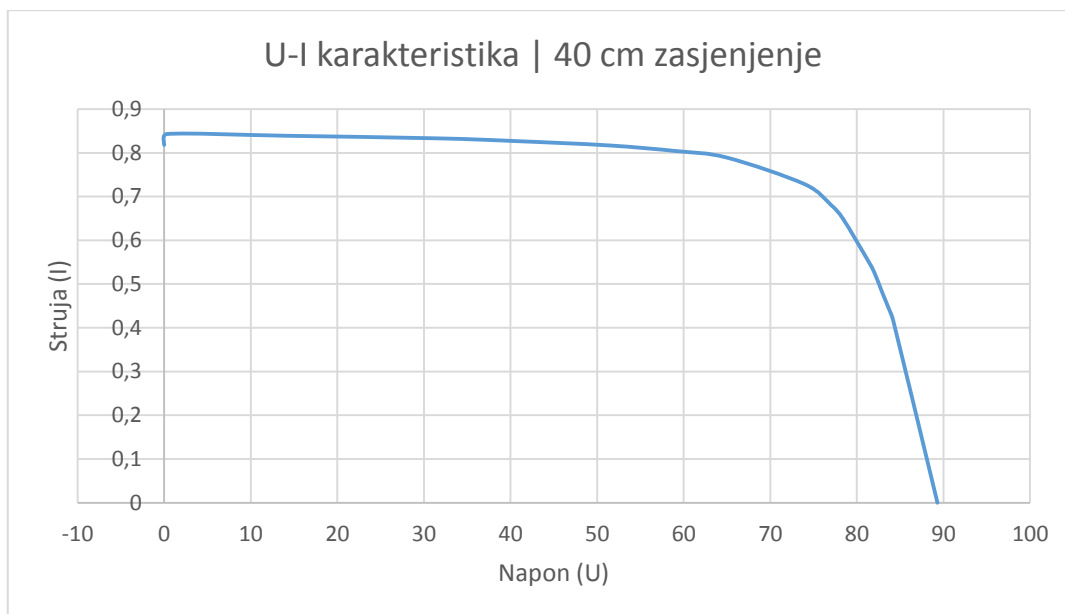
Slika 5.3. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 20 cm.

Četvrto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 30 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 730 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 668 W/m^2 .



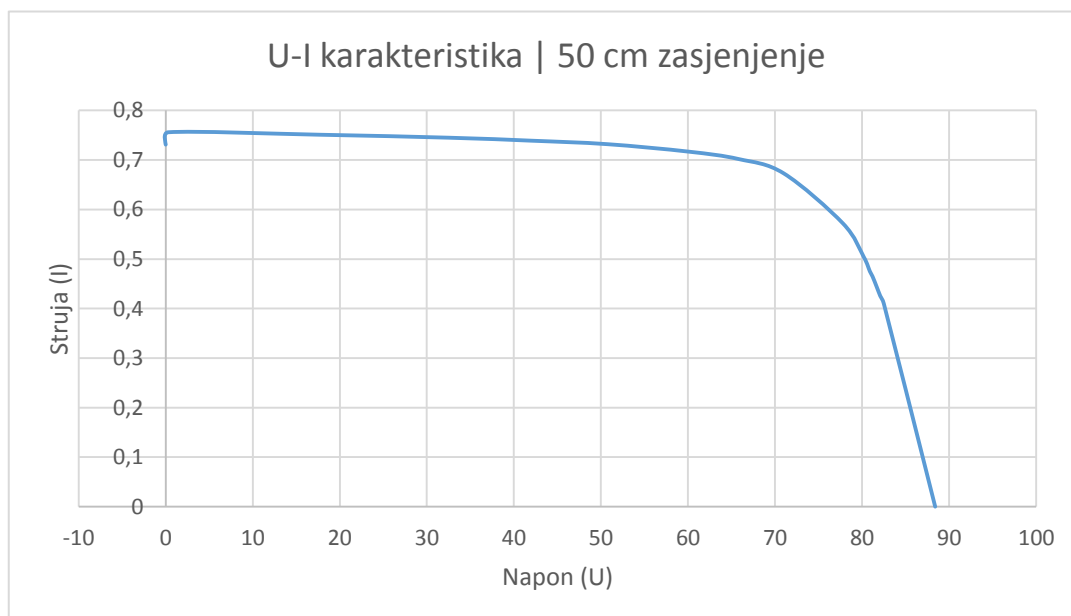
Slika 5.4. *U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 30 cm.*

Peto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 40 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 734 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 679 W/m^2 .



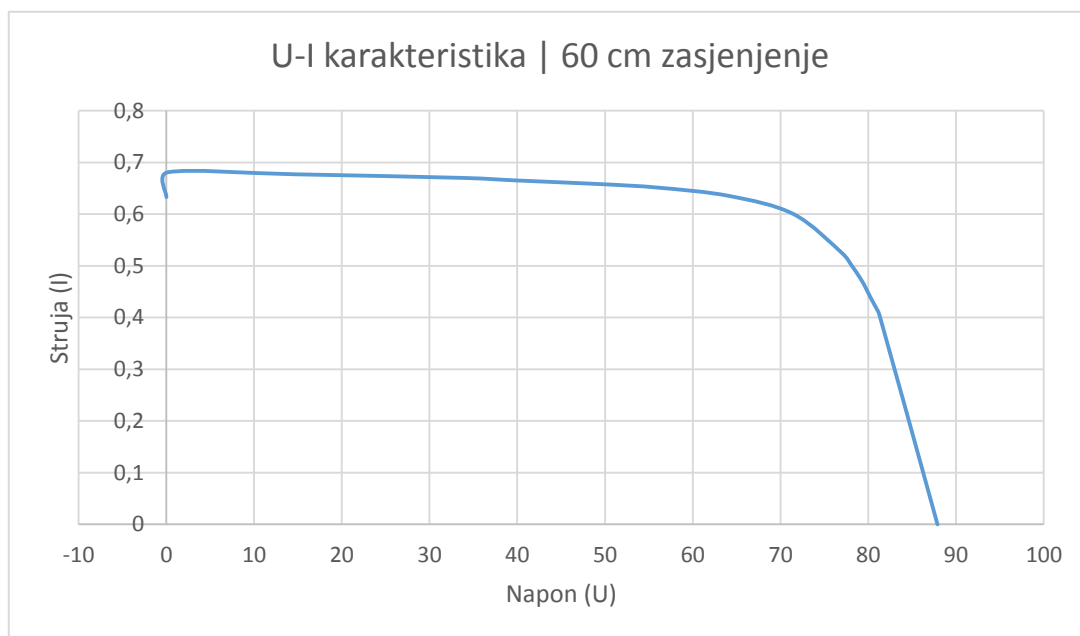
Slika 5.5. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 40 cm.

Šesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 50 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 740 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 677 W/m^2 .



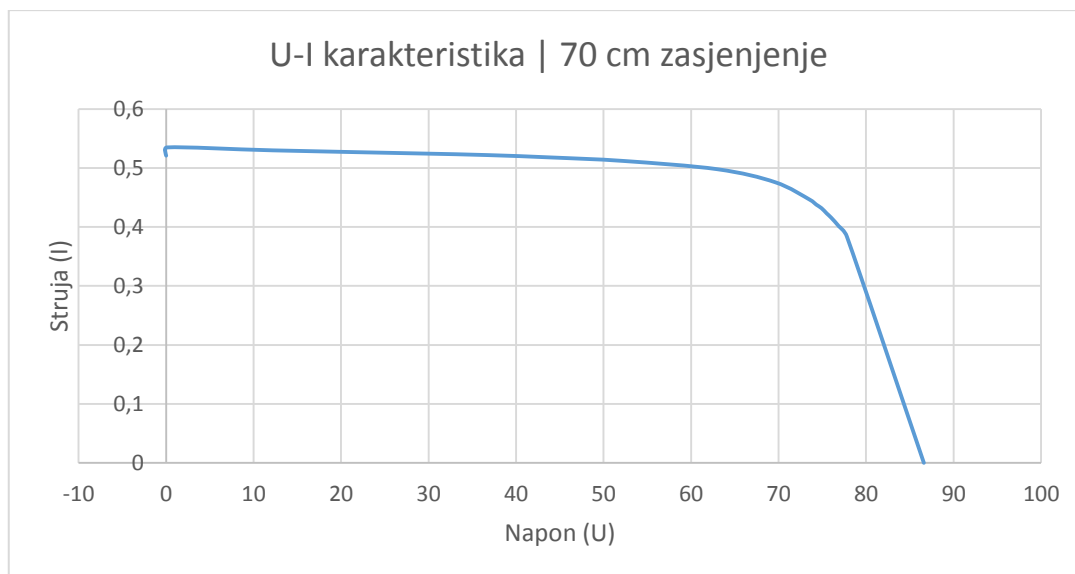
Slika 5.6. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 50 cm.

Sedmo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 60 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 745 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 680 W/m^2 .



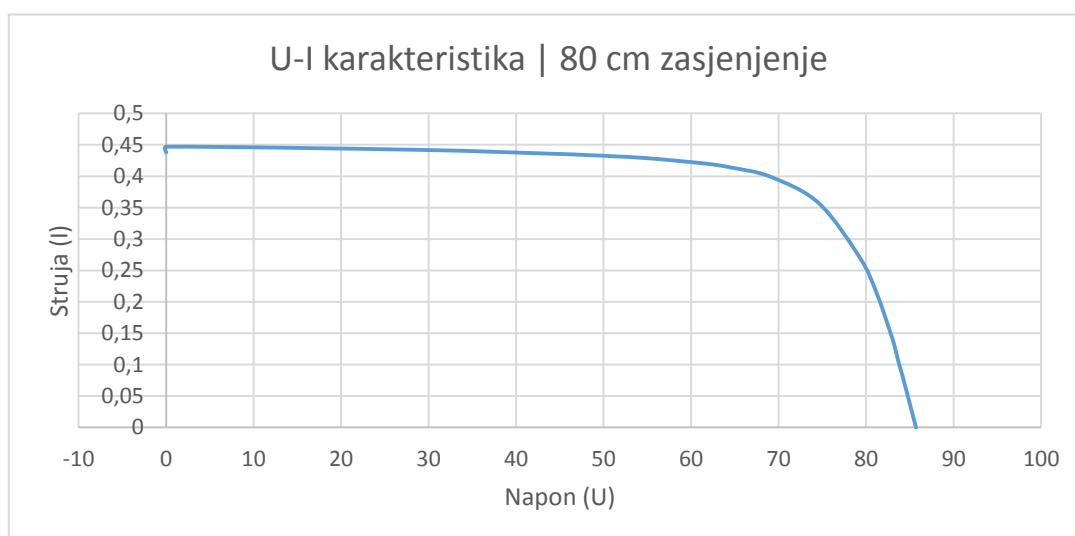
Slika 5.7. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 60 cm.

Osmo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 70 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 746 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 677 W/m^2 .



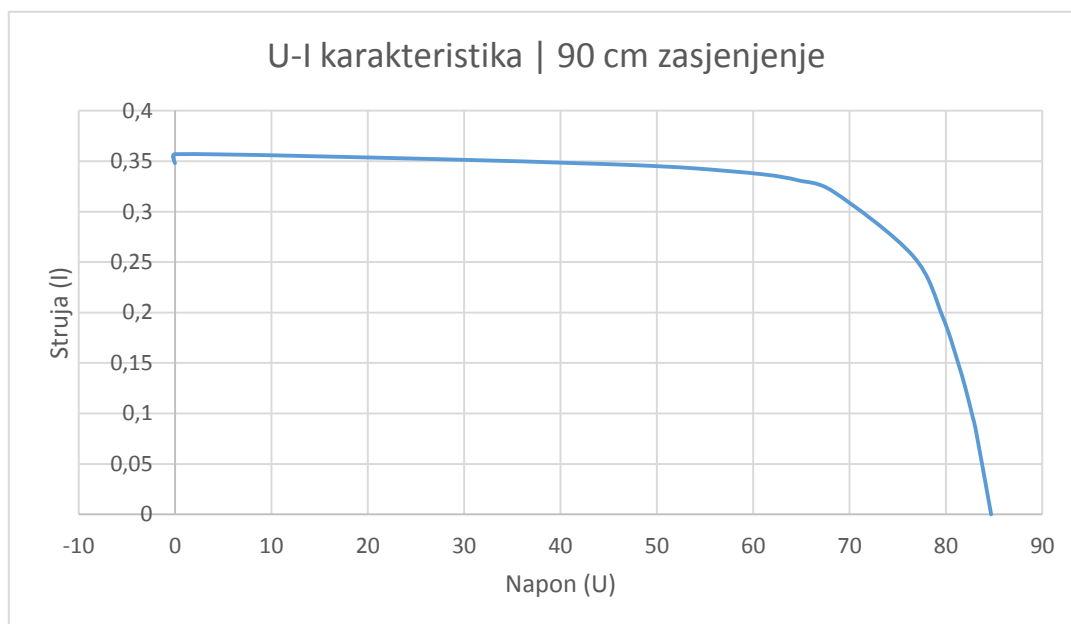
Slika 5.8. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 70 cm.

Deveto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 80 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 749 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 678 W/m^2 .



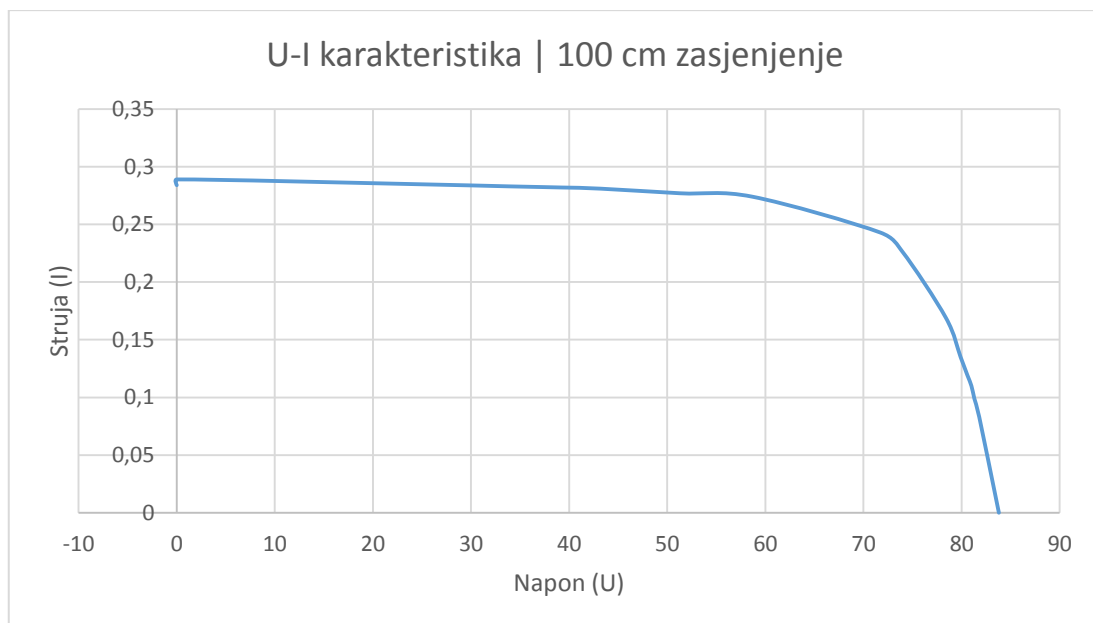
Slika 5.9. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 80 cm.

Deseto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 90 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 734 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 680 W/m^2 .



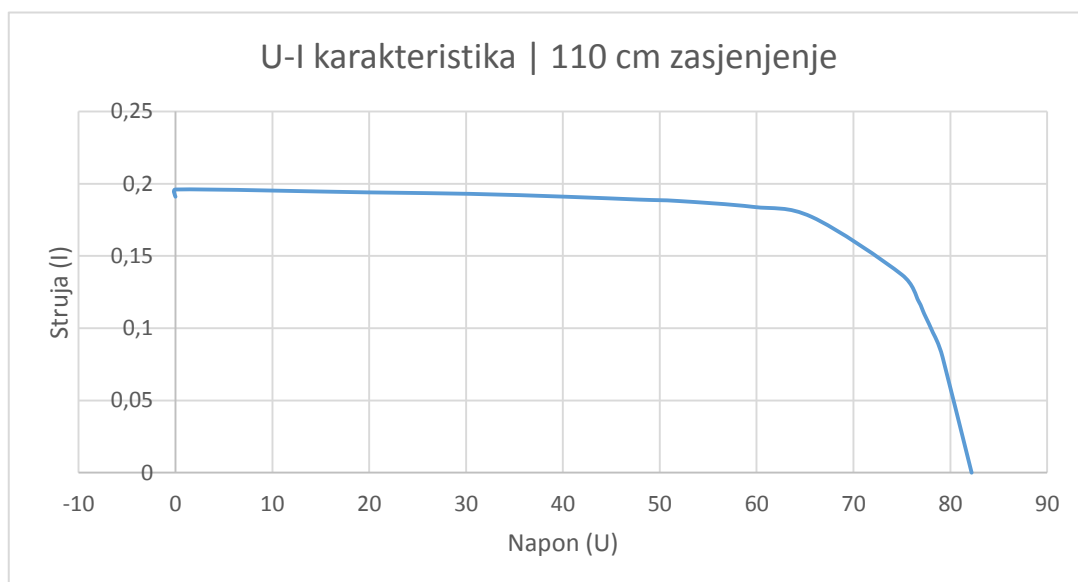
Slika 5.10. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 90 cm.

Jedanaesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 100 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 744 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 674 W/m^2 .

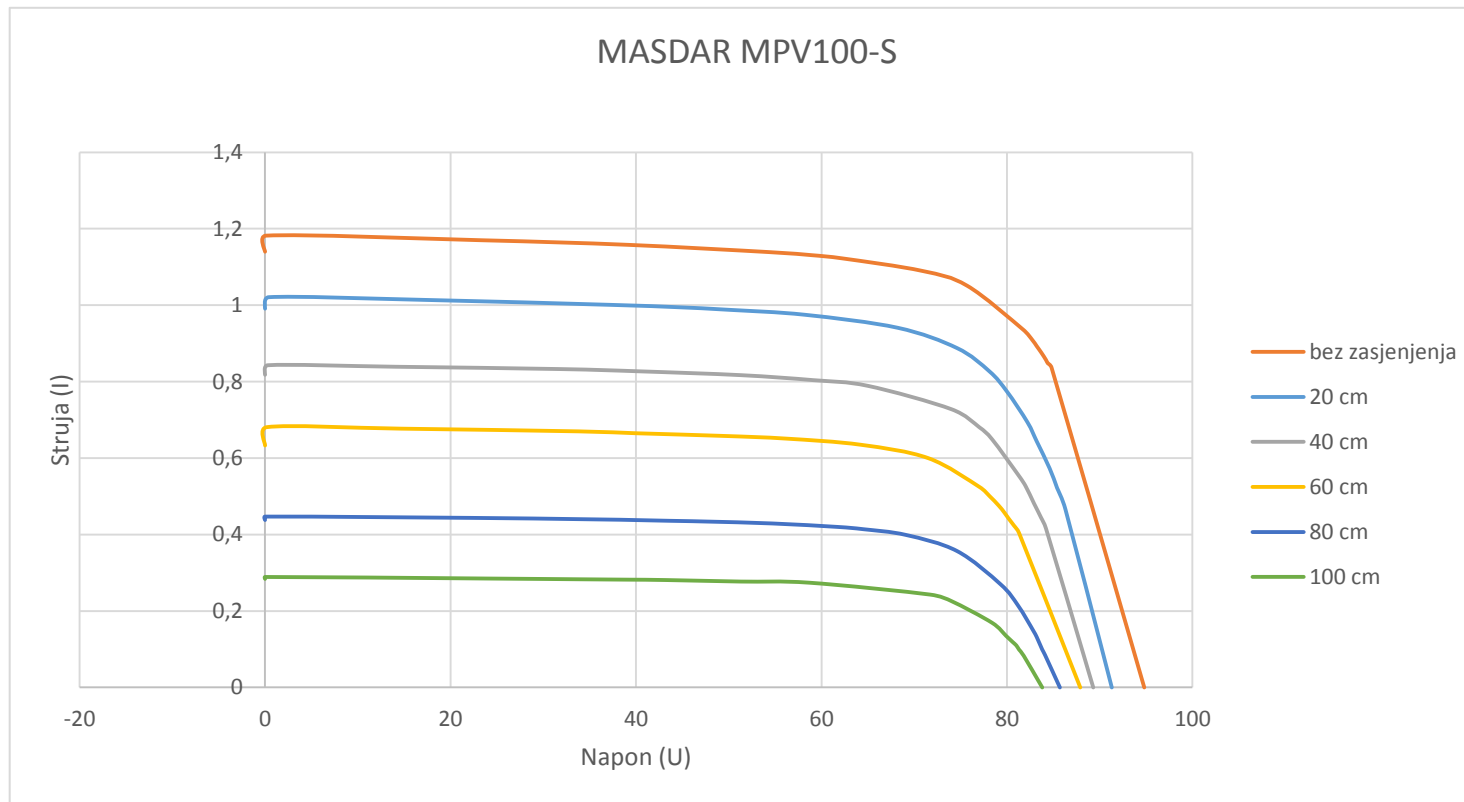


Slika 5.11. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 100 cm.

Dvanaesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 110 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 739 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 673 W/m^2 .



Slika 5.12. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 110 cm.



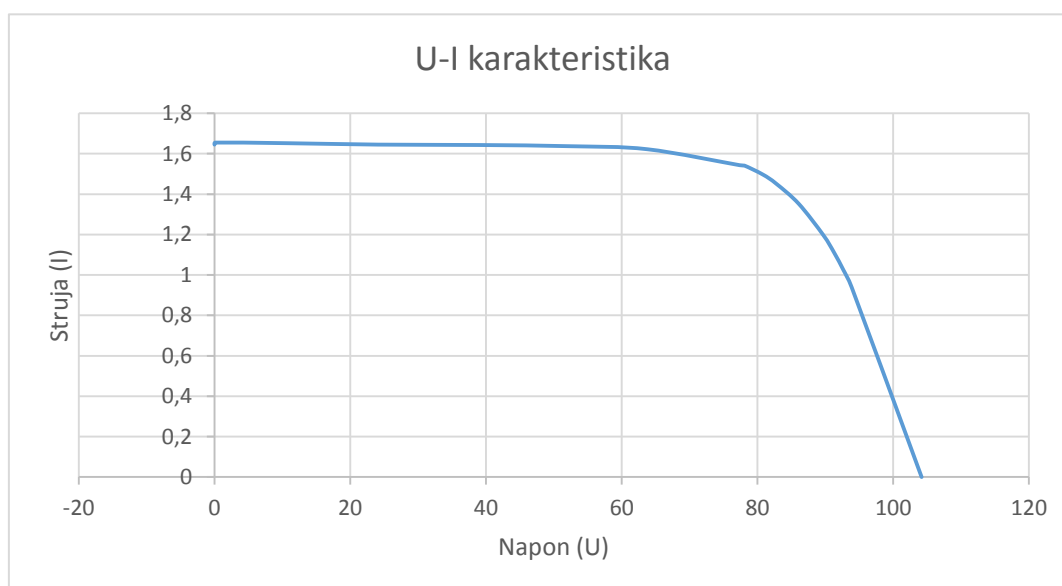
Slika 5.13. *U-I karakteristike bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.*

5.2. SOLAR FRONTIER SF-150

Slike od *slike 5.14.* do *slike 5.25.* prikazuju izmjerene U-I karakteristike fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150.

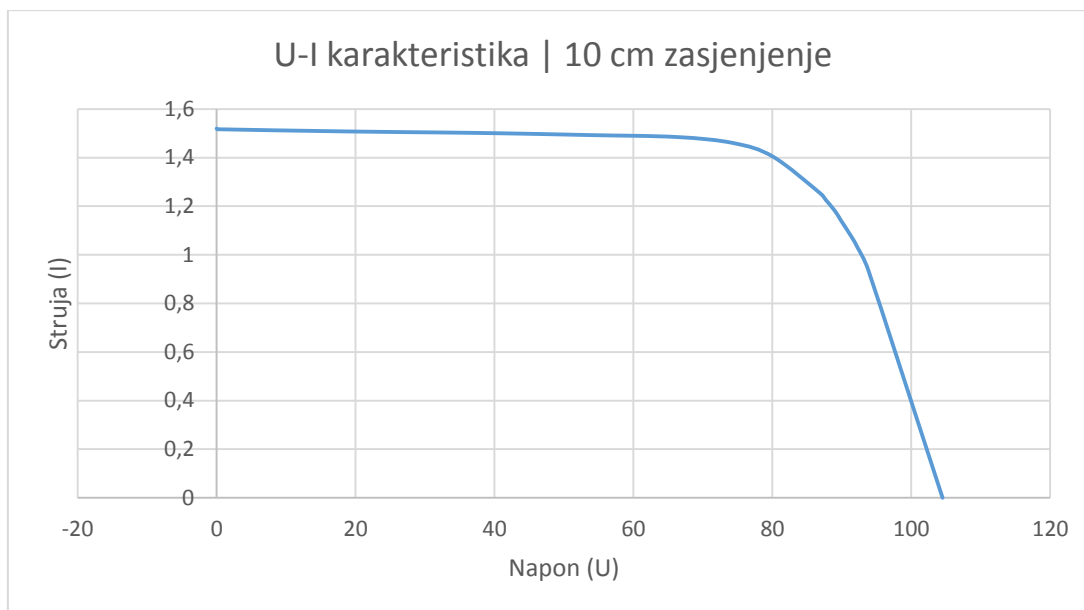
Na *slici 5.26.* su prikazane U-I karakteristike fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.

Prvo mjerenje je obavljeno bez zasjenjenja fotonaponskog modula. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 798 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 738 W/m^2 .



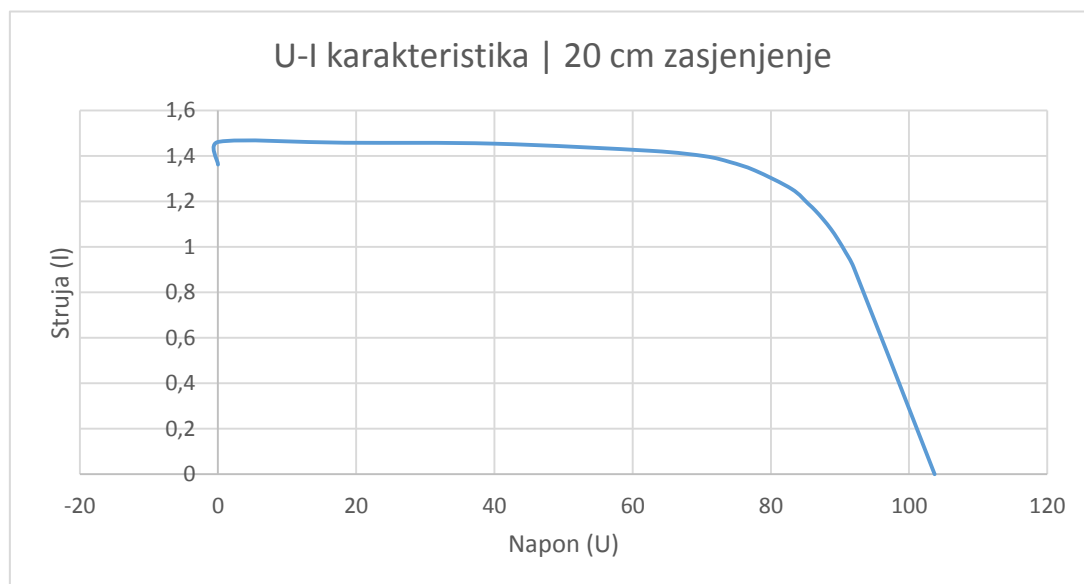
Slika 5.14. U-I karakteristika bez zasjenjenja fotonaponskog modula
SOLAR FRONTIER SF-150.

Drugo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 10 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 816 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 744 W/m^2 .



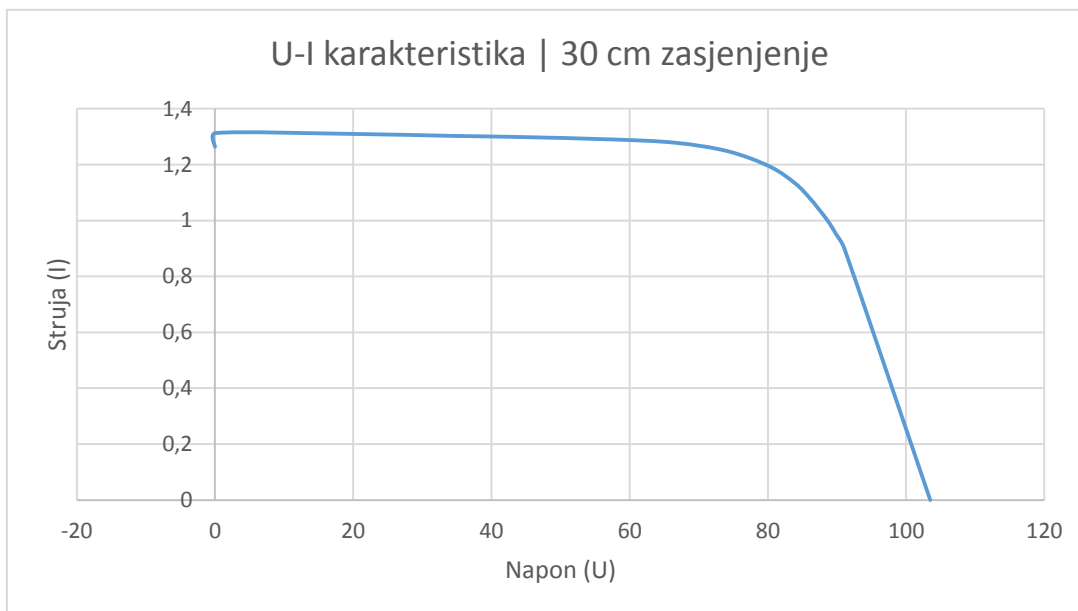
Slika 5.15. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 10 cm.

Treće mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 20 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 800 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 734 W/m^2 .



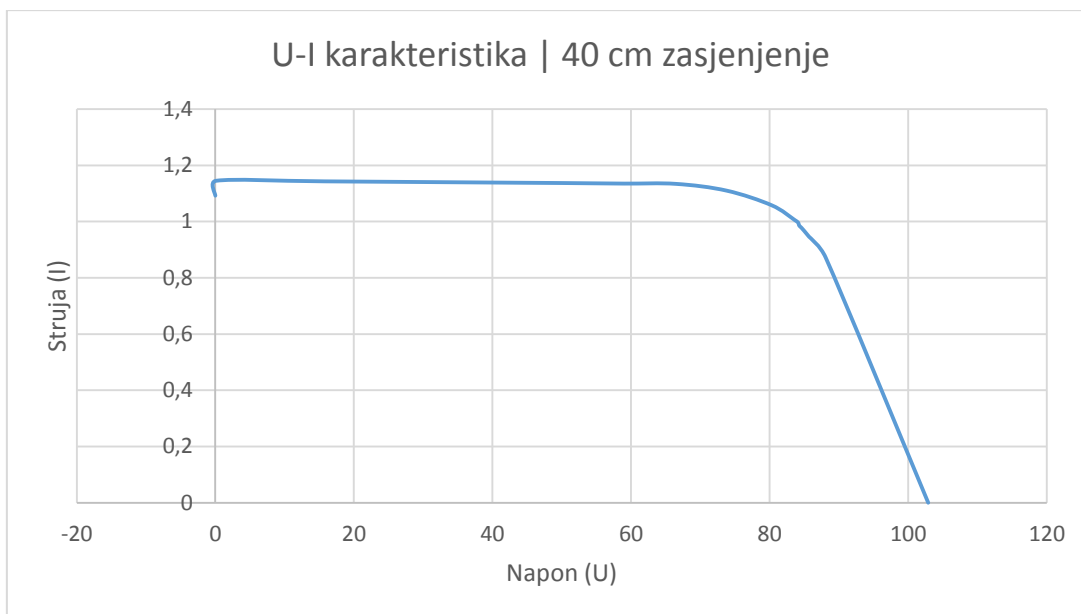
Slika 5.16. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 20 cm.

Četvrto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 30 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 813 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 770 W/m^2 .



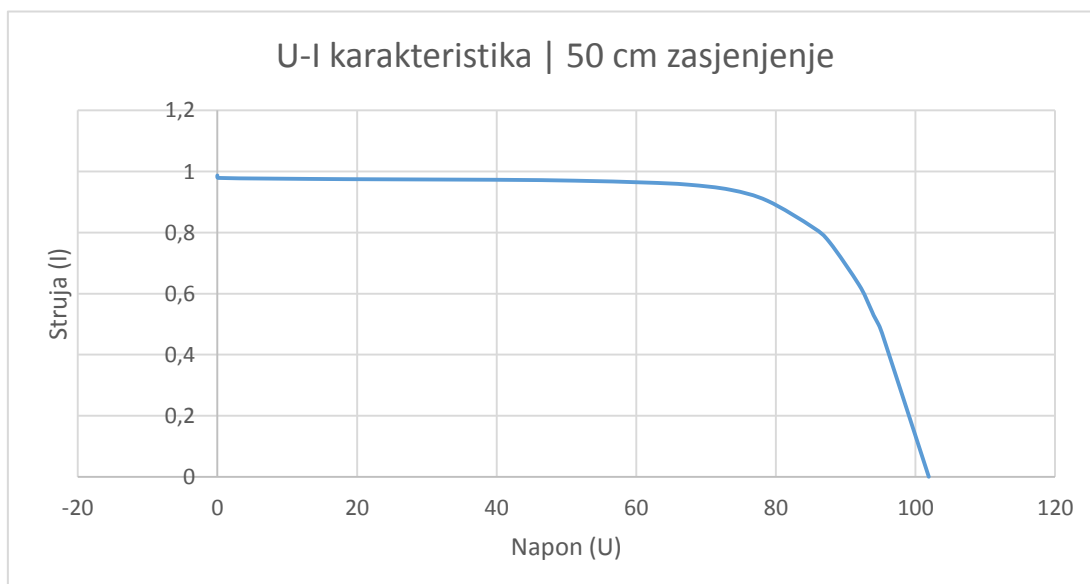
Slika 5.17. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 30 cm.

Peto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 40 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 794 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 723 W/m^2 .



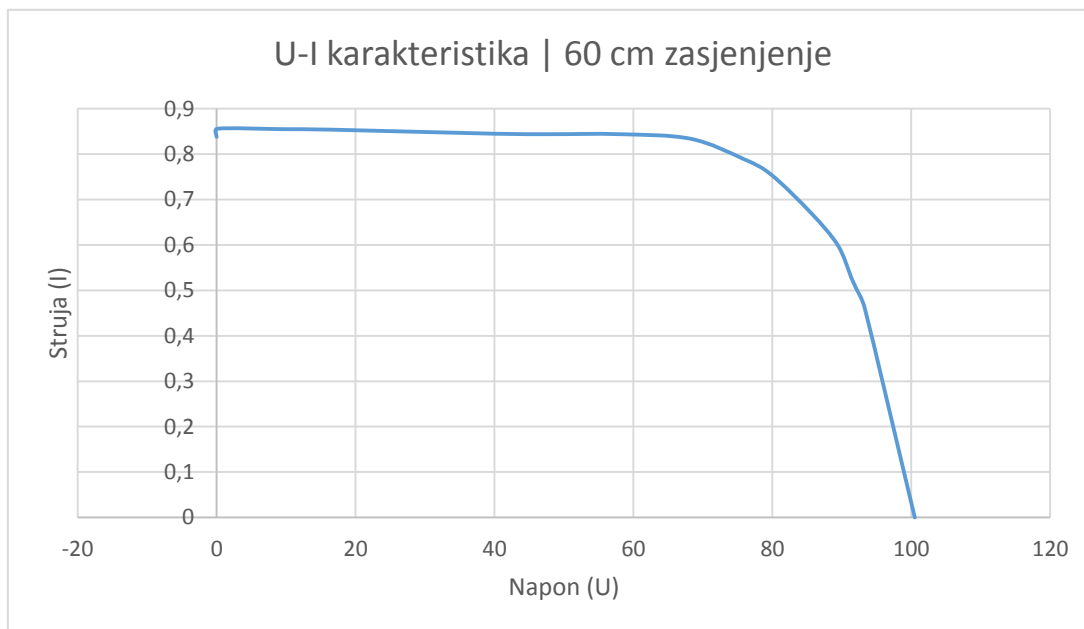
Slika 5.18. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 40 cm.

Šesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 50 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 813 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 752 W/m^2 .



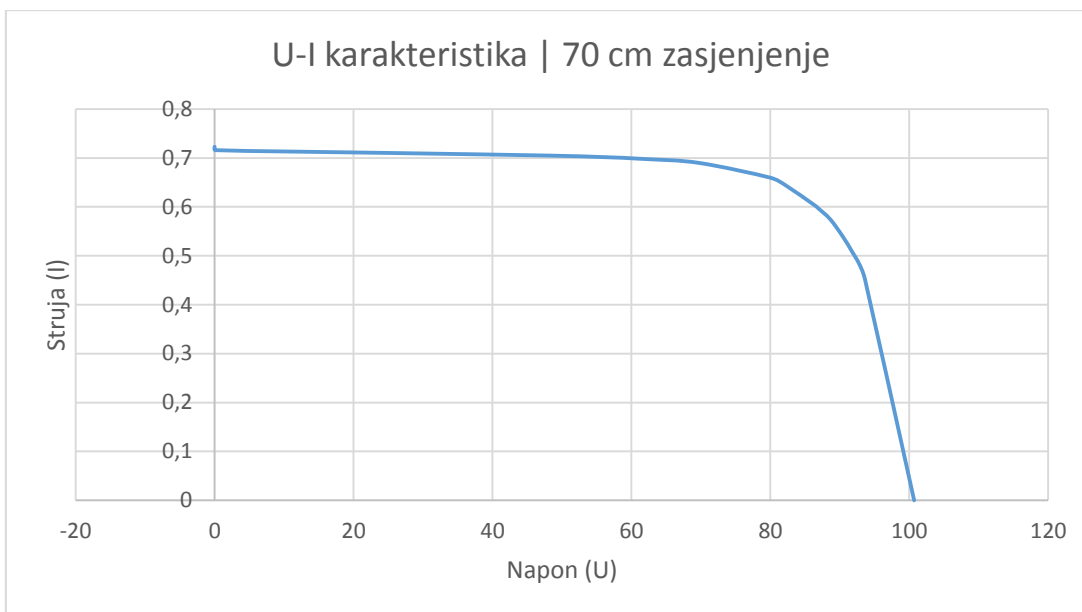
Slika 5.19. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 50 cm.

Sedmo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 60 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 773 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 705 W/m^2 .



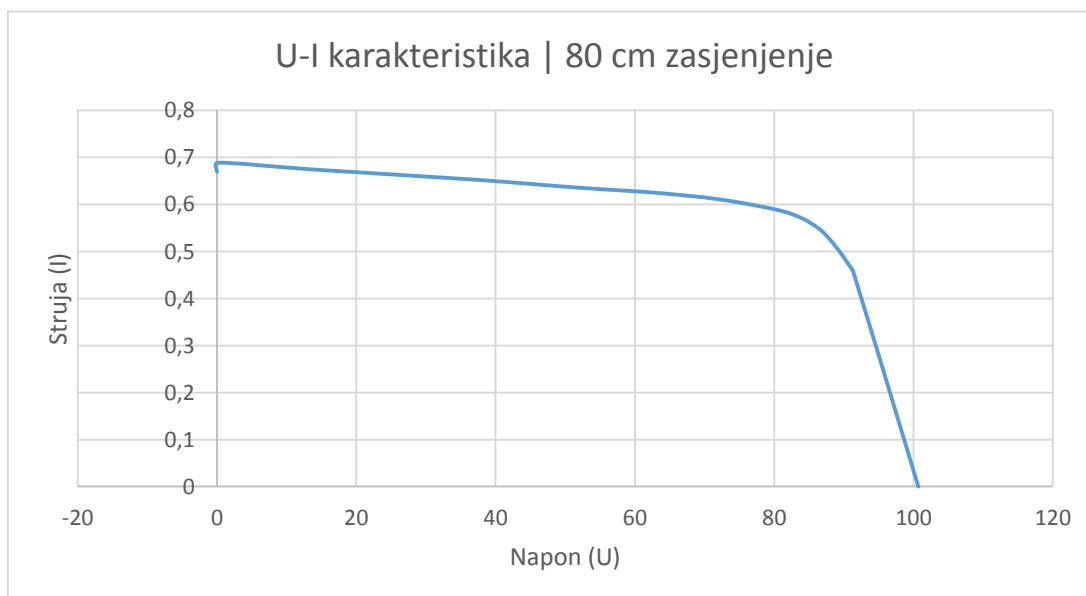
Slika 5.20. *U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 60 cm.*

Osmo mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 70 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 78 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 700 W/m^2 .



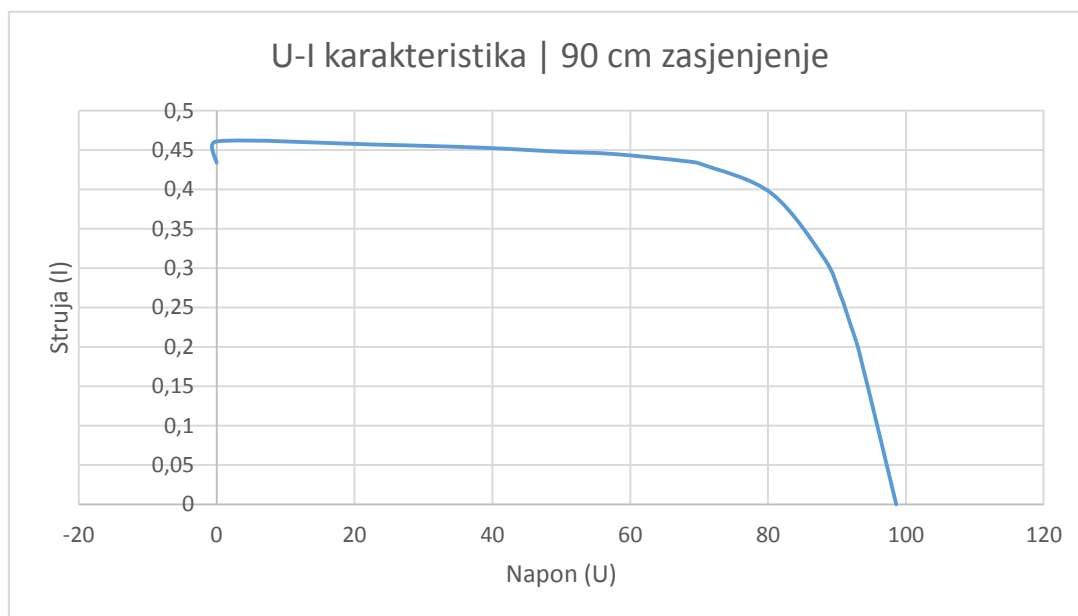
Slika 5.21. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 70 cm.

Deveto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 80 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 770 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 700 W/m^2 .



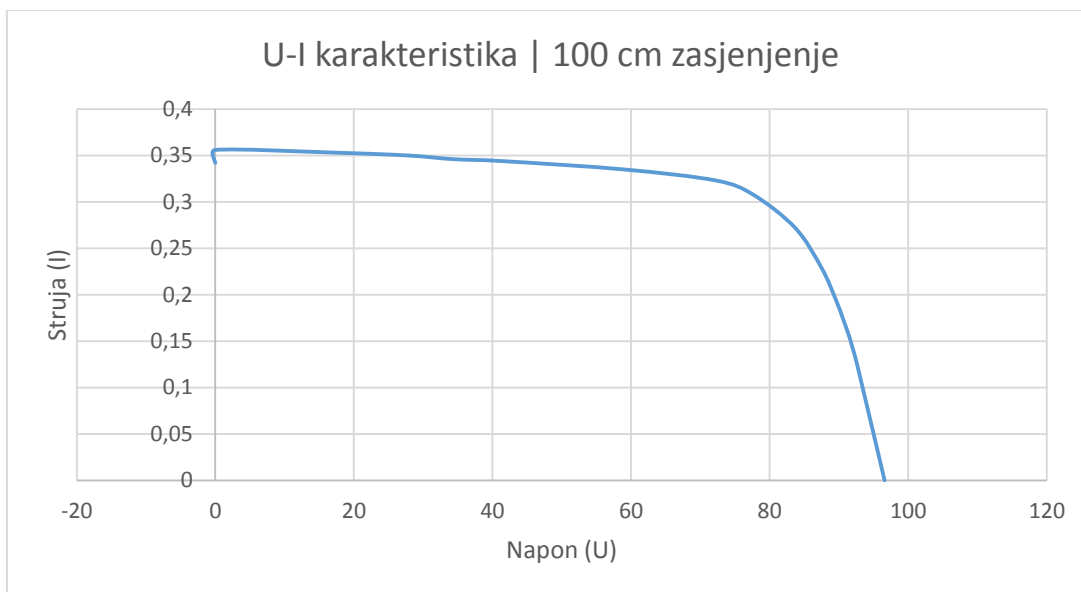
Slika 5.22. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 80 cm.

Deseto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 90 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 770 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 698 W/m^2 .



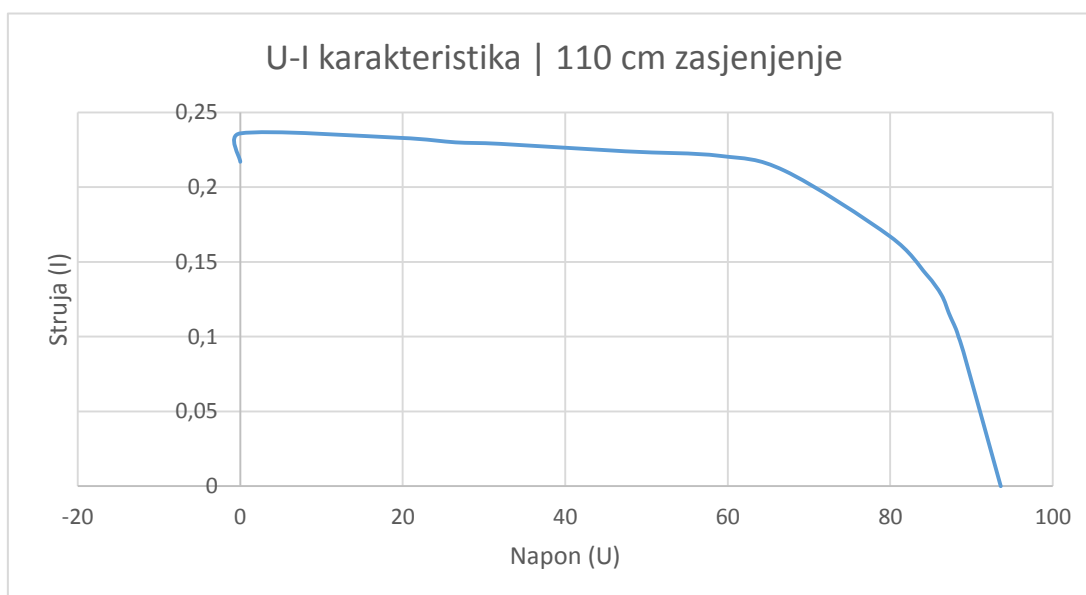
Slika 5.23. *U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 90 cm.*

Jedanaesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 100 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 806 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 735 W/m^2 .

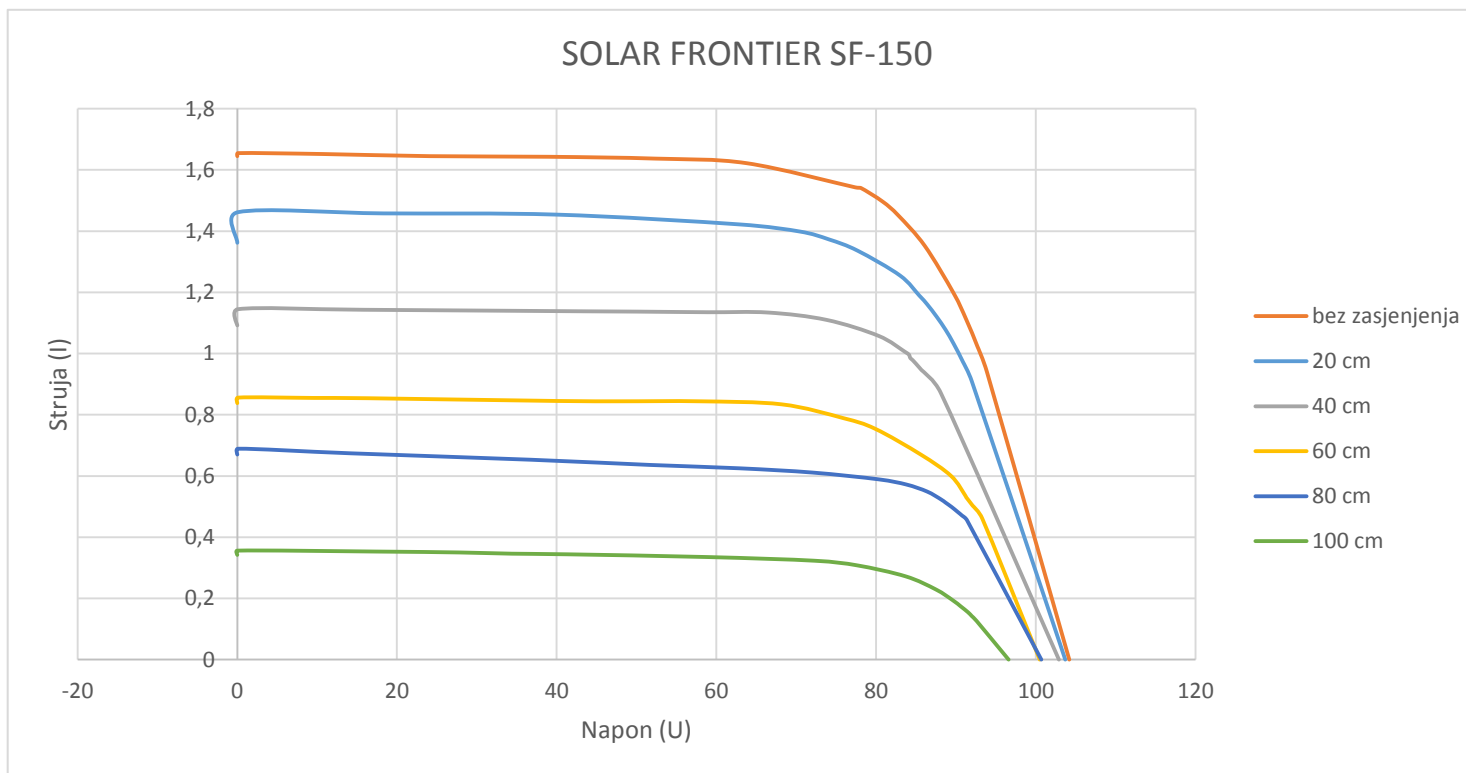


Slika 5.24. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 100 cm.

Dvanaesto mjerenje je obavljeno pri zasjenjenju fotonaponskog modula od 110 cm. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prikazao je ozračenost iznosa 821 W/m^2 , dok je mjerni instrument Metrel A1378 prikazao ozračenost iznosa 745 W/m^2 .



Slika 5.25. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 110 cm.



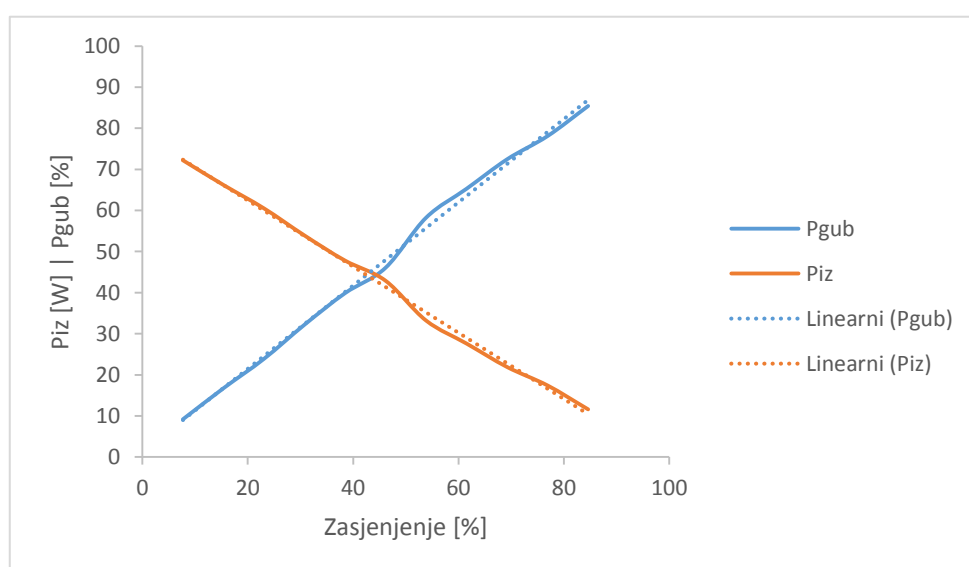
Slika 5.26. *U-I karakteristike bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.*

5.3. Analiza rezultata istraživanja

U poglavlju analize rezultata je iznesen tablični prikaz utjecaja zasjenjenja na karakteristiku mjerenih tankoslojnih fotonaponskih modula, odnosno na njihovu radnu točku, kako slijedi u *tablici 5.1.* i *tablici 5.2.*

Tablica 5.1. Tablični prikaz utjecaja zasjenjenja na karakteristiku tankoslojnog fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

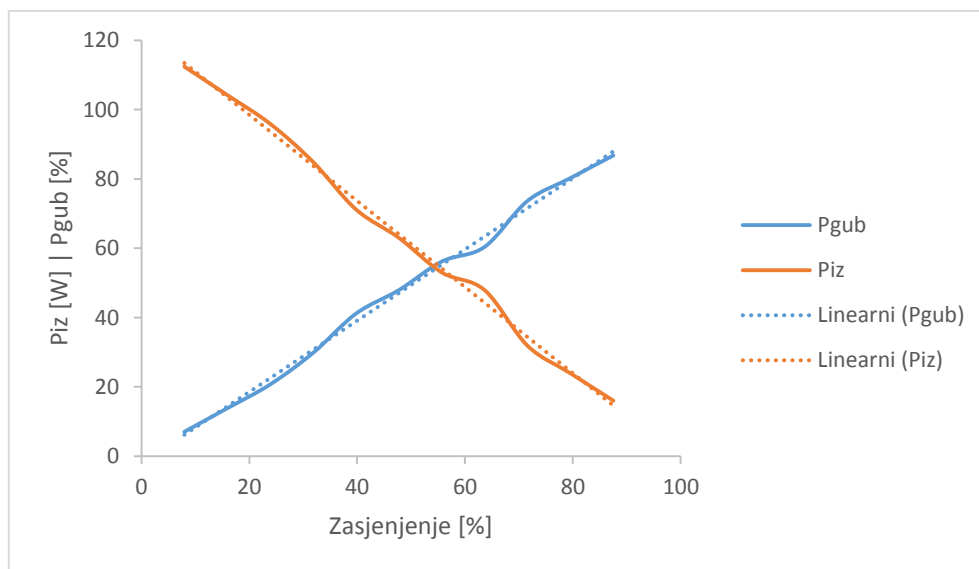
Zasjenjenje (cm)	Zasjenjenje (%)	Snaga bez zasjenjenja (W)	Snaga pri zasjenjenju (W)	Smanjenje iznosa snage (W)	Smanjenje iznosa snage (%)
10	7,69	79,5	72,2	7,3	9,18
20	15,38	79,5	66,2	13,3	16,73
30	23,08	79,5	60,5	19,0	23,89
40	30,77	79,5	53,9	25,6	32,20
50	38,46	79,5	47,8	31,7	39,87
60	46,15	79,5	42,9	36,6	46,04
70	53,85	79,5	33,2	46,3	58,24
80	61,54	79,5	27,6	51,9	65,28
90	69,23	79,5	21,9	57,6	72,45
100	76,92	79,5	17,4	62,1	78,11
110	84,61	79,5	11,6	67,9	85,41



Slika 5.27. Prikaz karakteristika P [W] i P_{gub} [%] s postotkom zasjenjenja [%].

Tablica 5.2. Tablični prikaz utjecaja zasjenjenja na karakteristiku tankoslojnog fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150.

Zasjenjenje (cm)	Zasjenjenje (%)	Snaga bez zasjenjenja (W)	Snaga pri zasjenjenju (W)	Smanjenje iznosa snage (W)	Smanjenje iznosa snage (%)
10	7,96	120,9	112,4	8,5	7,03
20	15,91	120,9	104,2	16,7	13,81
30	23,87	120,9	95,9	25,0	20,68
40	31,82	120,9	84,9	36,0	29,78
50	39,78	120,9	71,2	49,7	41,11
60	47,73	120,9	63,0	57,9	47,89
70	55,69	120,9	53,0	67,9	56,16
80	63,64	120,9	47,9	73,0	60,38
90	71,56	120,9	31,9	89,0	73,61
100	79,55	120,9	23,9	97,0	80,23
110	87,51	120,9	16,0	104,9	86,76



Slika 5.28. Prikaz karakteristika P [W] i P_{gub} [%] s postotkom zasjenjenja [%].

Iz podataka prikazanih u *tablici 5.1.* i *tablici 5.2.* je vidljivo da postotak smanjenja snage radne točke tankoslojnog fotonaponskog modula približno prati postotak zasjenjenja površine tankoslojnog fotonaponskog modula.

Također, iz podataka prikazanih u *tablici 5.1.* i *tablici 5.2.* je vidljivo da tankoslojni fotonaponski modul SOLAR FRONTIER SF-150 za ne puno promijenjenu ozračenost fotonaponskih modula proizvodi više električne snage od tankoslojnog fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

6. ZAKLJUČAK

Fotonaponski moduli tankoslojne fotonaponske tehnologije kojom su izrađeni imaju karakteristike takve da postotak smanjenja iznosa električnih karakteristika tankoslojnih fotonaponskih modula (snaga) približno prati postotak zasjenjenja istih tankoslojnih fotonaponskih modula.

Temeljem dosadašnjeg znanja i iskustva stečenog tijekom školovanja zaključujem da tankoslojni fotonaponski moduli, razmatrajući isključivo utjecaj zasjenjenja na karakteristike fotonaponskih modula, imaju bitno manje gubitke nastale utjecajem njihovog zasjenjenja u odnosu na druge fotonaponske module različitih tehnologija izrade, kao što su npr. monokristalni fotonaponski moduli ili polikristalni fotonaponski moduli.

Kako opadanje snage radne točke fotonaponskih sustava ima preveliki utjecaj na elektroenergetske sustave, odnosno ima utjecaj na stabilnost elektroenergetskog sustava na koji su priključeni, tako je prevažno pri projektiranju i izradi fotonaponskih sustava izbjeći njihova potencijalna zasjenjenja. Navedeno je osobito važno ako iz razumljivih razloga pretpostavimo daljnje povećanje zastupljenosti fotonaponskih sustava u ukupnim elektroenergetskim sustavima u svijetu.

LITERATURA

1. *International Energy Agency; World Energy Statistics; 2016.*
2. *European Commission; 2020 climate & energy package;*
Mrežna adresa: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm
Pristup sadržaju, svibanj 2016.
3. *Paul A. Lynn; Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics; 2010.*
4. *Soteris Kalogirou; Solar Energy Engineering - Processes and Systems, 2009.*
5. *Yunlin Sun, Xiangzhi Li, Ruijiang Hong, Hui Shen; Analysis on the Effect of Shading on the Characteristics of Large-scale on-grid PV System in China, veljača 2013.*
6. *Andrew Zulu, Gelasius Kashweka; The Influence of Artificial Light and Shading on Photovoltaic Solar Panels; 2013.*
7. *L. Fialho, R. Melicio, V.M.F. Mendes, J. Figueiredo, M. Collares-Pereira; Effect of Shading on Series Solar Modules: Simulation and Experimental Results; 2014.*
8. *ABB; Technical Application Papers No.10, Photovoltaic plants; 2010.*
Mrežna adresa:
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/\\$FILE/Vol.10.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/$FILE/Vol.10.pdf)
Pristup sadržaju, svibanj 2016.
9. *Masters, Gilbert., M.; Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2004.*

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad sadrži opisane sve važne pojmove o fotonaponskim sustavima, fotonaponskim modulima i fotonaponskim ćelijama. Navedene su i činjenice vezane uz Sunčevu energiju. Mjerenja su obavljena na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Korišteni su fotonaponski moduli MASDAR MPV100-S i SOLAR FRONTIER SF-150, tankoslojne tehnologije izrade. Mjerene su električne karakteristike tankoslojnih fotonaponskih modula pri različitim scenarijima zasjenjenja.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, fotonaponski moduli, fotonaponske ćelije, napon, struja, snaga, sunčeva ozračenost, mjerenje, analiza

ABSTRACT

This paper contains described all the important concepts of photovoltaic systems, photovoltaic modules and photovoltaic cells. There are the facts related to solar energy. Measurements were carried out at the Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology in Osijek. Photovoltaic modules Masdar MPV100-S and SOLAR FRONTIER SF-150, thin-film manufacturing technologie, were used for the measurements. Electrical characteristics of thin-film photovoltaic modules were measured in different shading scenarios.

Key words: photovoltaic systems, photovoltaic modules, photovoltaic cells, voltage, current, power, solar irradiance, measurement, analysis

ŽIVOTOPIS

Josip Bušić rođen 30. travnja 1991. godine u Splitu, završava osnovnu školu u Imotskom, nakon čega se upisuje u srednju školu u istom mjestu gdje završava prirodoslovno – matematičku gimnaziju. U Osijeku, rujna 2014. godine završava sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika.

Josip Bušić

PRILOG

Sveukupni tekst diplomskog rada se nalazi na CD-u.

Popis slika

Slika 2.1. Zasjenjenja na numeriranim fotonaponskim modulima uzrokovana dijelovima distribucijskog sustava, kao što su vodovi ili nosivi stupovi vodova, u blizini fotonaponskih sustava.

Slika 2.2. Šest strujno-naponskih karakteristika koje odgovaraju šest numeriranih modula na kojima je provedeno istraživanje.

Slika 2.3. Fotonaponski modul, tri četvrtine prekrivene.

Slika 2.4. Strujno-naponska karakteristika.

Slika 2.5. Karakteristika snage i napona.

Slika 2.6. Fotonaponski sustav formiran od dva monokristalna silicijska fotonaponska modula spojena u seriju.

Slika 2.7. Strujno-naponska karakteristika simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem.

Slika 2.8. Karakteristika snage i napona simulirana i izmjerena bez zasjenjenja i s djelomičnim zasjenjenjem.

Slika 3.1. Sunčevo zračenje po mjesecima.

Slika 3.2. Intenzitet sunčevog zračenja od Sunca, preko atmosfere do površine Zemlje.

Slika 3.3. Komponente sunčevog zračenja.

Slika 3.4. Sunčani atlas Zemlje.

Slika 3.5. Fotonaponski modul.

Slika 3.6. Fotonaponski sustav.

Slika 3.7. Fotonaponski sustav.

Slika 3.8. Presjek standardnog fotonaponskog modula.

Slika 3.9. Shema fotonaponskog sustava spojenog na mrežu.

Slika 3.10. Fotonaponska ćelija.

Slika 3.11. Princip rada fotonaponske ćelije.

Slika 3.12. Fotonaponski efekt.

Slika 3.13. Principijelna shema jednofaznog invertera.

Slika 3.14. Princip upravljanja pulsno širinskom modulacijom.

Slika 3.15. MPP točka fotonaponskog generatora.

Slika 3.16. Primjeri samostojećih fotonaponskih sustava.

Slika 3.17. Princip rada samostojećeg fotonaponskog sustava.

Slika 3.18. Primjeri fotonaponskih sustava spojenih na mrežu.

Slika 3.19. Fotonaponski sustav spojen na mrežu.

Slika 3.20. Princip rada fotonaponskog sustava spojenog na mrežu.

Slika 3.21. Strujno – naponska karakteristika fotonaponskog modula.

Slika 3.22. Prikaz efekta diode unutar fotonaponske ćelije.

Slika 3.23. Ekvivalentni strujni krug fotonaponske ćelije.

Slika 2.34. Utjecaj otpora R_s u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije na izgled U-I karakteristike.

Slika 3.25. Utjecaj otpora R_p u nadomjesnoj shemi fotonaponske ćelije na oblik U-I karakteristike.

Slika 4.1. Tankoslojni fotonaponski modul

Slika 4.2. Struktura CdTeS tankoslojne fotonaponske ćelije.

Slika 4.3. Izgled fotonaponskog modula tankoslojne tehnologije, MASDAR MPV100-S

Slika 4.4. Izgled fotonaponskog modula tankoslojne tehnologije, SOLAR FRONTIER SF-150

Slika 4.5. Mjerni instrument Metrix PX110 Powermeter prilikom obavljanja mjerenja.

Slika 4.6. Mjerni instrument PeakTech 3320 DMM prilikom obavljanja mjerenja.

Slika 4.7. Mjerni instrument Seaward SOLAR Survey200 prilikom obavljanja mjerenja.

Slika 4.8. Mjerni instrument Metrel A1378 prilikom obavljanja mjerenja.

Slika 4.9. Fotonaponski modul pri normalnoj ozračenosti.

Slika 4.10. Tankoslojni fotonaponski modul pri normalnoj ozračenosti u trenutku obavljanja mjerenja.

Slika 4.11. Fotonaponski modul pri zasjenjenjima od 10 cm, 20 cm i 30 cm.

Slika 4.12. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 40 cm, 50 cm i 60 cm.

Slika 4.13. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 70 cm, 80 cm i 90 cm.

Slika 4.14. Fotonaponski modul pri zasjenjenju od 100 cm i 110 cm.

Slika 4.15. Tankoslojni fotonaponski modul pri zasjenjenju od 70 cm u trenutku obavljanja mjerenja.

Slika 5.1. U-I karakteristika bez zasjenjenja fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

Slika 5.2. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 10 cm.

Slika 5.3. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 20 cm.

Slika 5.4. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 30 cm.

Slika 5.5. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 40 cm.

Slika 5.6. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 50 cm.

Slika 5.7. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 60 cm.

Slika 5.8. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 70 cm.

Slika 5.9. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 80 cm.

Slika 5.10. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 90 cm.

Slika 5.11. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 100 cm.

Slika 5.12. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 110 cm.

Slika 5.13. U-I karakteristike bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.

Slika 5.14. U-I karakteristika bez zasjenjenja fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150.

Slika 5.15. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 10 cm.

Slika 5.16. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 20 cm.

Slika 5.17. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 30 cm.

Slika 5.18. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 40 cm.

Slika 5.19. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 50 cm.

Slika 5.20. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150

Slika 5.21. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 70 cm.

Slika 5.22. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150

Slika 5.23. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 90 cm.

Slika 5.24. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 100 cm.

Slika 5.25. U-I karakteristika pri zasjenjenju fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150

Slika 5.26. U-I karakteristike bez zasjenjenja i pri zasjenjenjima fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150 od 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm te 100 cm.

Slika 5.27. Prikaz karakteristika P [W] i P_{gub} [%] s postotkom zasjenjenja [%].

Slika 5.28. Prikaz karakteristika P [W] i P_{gub} [%] s postotkom zasjenjenja [%].

od 110 cm.

Popis tablica

Tablica 2.1. Podaci za Siemens SP75 fotonaponski modul pri standardnim tehničkim uvjetima.

Tablica 3.1. Refleksijska moć.

Tablica 4.1. Tehničke specifikacije tankoslojnog modula MASDAR MPV100-S pri temperaturi od 25°C

Tablica 4.2. Tehničke specifikacije tankoslojnog modula SOLAR FRONTIER SF-150 pri temperaturi od 25°C.

Tablica 5.1. Tablični prikaz utjecaja zasjenjenja na karakteristiku tankoslojnog fotonaponskog modula MASDAR MPV100-S.

Tablica 5.2. Tablični prikaz utjecaja zasjenjenja na karakteristiku tankoslojnog fotonaponskog modula SOLAR FRONTIER SF-150.